

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
المركز الجامعي بلحاج بوشعيب  
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent  
Institut de Technologie  
Département de sciences Technologie



Projet de fin d'études Pour l'obtention du diplôme de Master en :

**Domaine** : Science et Technologie

**Filière** : Electromécanique

**Spécialité** : Electromécanique

Thème

***Etude et simulation d'une éolienne avec une machine  
asynchrone double alimentation***

Présenté Par :

- 1) Benghorzi Abderrahim
- 2) Benhadda Houcine

Devant les jurys composés de :

Dr Touhami .A	M.A.A (Ain Temouchent) Président
Dr Aissou .M	M.C.A (Ain Temouchent) Examineur
Dr Mecirdi .N	M.A.A(Ain Temouchent) Encadrant
Mr Bensaid .B	Doctorant Co-encadrant

Année universitaire : 2019/2020

## *Dédicace*

*Je tiens à dédier ce mémoire :*

*A ma très chère Mère et à mon cher Père, en témoignage et en  
gratitude de leurs dévouements,*

*de leurs soutien permanent durant toutes mes années*

*d'études, leurs sacrifices illimités,*

*leurs réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour  
mon éducation,*

*mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout  
cela et pour ce qui ne peut être dit,*

*mes affectations sans limite.*

*A ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage,  
à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance :*

*A toute ma famille surtout mes parents que j'aime beaucoup.*

*A mon cher binôme Houcine pour tous les moments de joie et  
de peine qu'on a passée ensemble, A sa Famille aussi.*

*A mes Voisins et à mes Amis.*

*A vous tous un grand merci.*

*Abderrahim , Houcine ...*

## *Remerciements*

*Nos remerciements vont tout premièrement à Dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donnée durant toutes ces longues années.*

*Nous exprimons nos profondes gratitudees à nos parents pour leurs encouragements, leur soutien et pour les sacrifices qu'ils ont enduré.*

*Nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre encadrant Monsieur " Mecirdi Noureddine " et Mr " Bensaid.B " pour avoir d'abord proposé ce thème, pour le suivi continuuel tout le long de la réalisation de cette thèse et qui n'a pas cessée de nous donner ses conseils et remarques.*

*Nous remercions les membres de jury Dr " Fouhami.A " et Dr " Aissou.M " d'examen pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de ce travail.*

*Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à accomplir ce travail.*

*Nous remercions vont aussi à tous les enseignants du département d'électromécanique qui ont contribué à notre formation.*

## Résumé :

Ce mémoire présente l'étude et la simulation d'une éolienne avec une machine asynchrone double alimentation. Nous sommes présentés les différents types d'énergies renouvelables et les différents éoliens et leurs principes de fonctionnement, on a ajouté aussi une présentation de quelques systèmes de conversion de l'énergie éolienne utilisant la machine asynchrone. Nous avons détaillé une modélisation de la partie mécanique de l'éolienne. On a consacré à la génératrice asynchrone à double alimentation, on a modélisé le système global d'une éolienne à vitesse variable.

### الملخص:

تقدم هذه المذكرة دراسة ومحاكاة لتوربينات الرياح بألة مزدوجة الطاقة غير متزامنة. سنقدم أنواع مختلفة من الطاقات المتجددة وتوربينات الرياح المختلفة ومبدأ تشغيلها ، كما قمنا بإضافة عرض تقديمي لبعض أنظمة تحويل طاقة الرياح باستخدام الآلة غير المتزامنة. لقد قمنا بنمذجة الجزء الميكانيكي من توربينات الرياح و للمولد غير المتزامن المزود بمصدر طاقة مزدوج ،وقد قمنا بنمذجة النظام العام لتوربينات الرياح متغيرة السرعة .

<b>Sommaire</b>	<b>Page</b>
✓ Dédicaces	
✓ Remerciements	
✓ Résumé	
✓ Liste des figures	
✓ Liste des tableaux	
✓ Liste de notations et symboles	
<b>Introduction Générale</b>	1
<b>Chapitre I</b>	
<b>Généralité sur les énergies renouvelables</b>	
Introduction	3
Notions et principe sur les énergies renouvelables	3
l'énergie hydraulique(ou hydrau-électricité)	4
Energie de la géothermie	5
l'énergie Biomasse	6
L'énergie solaire	7
I.5-a L'énergie solaire thermique	9
I.5-b L'énergie solaire à effet photovoltaïque	9
I.5-b-1-PRINCIPE	10
l'énergie éolienne	10
Production mondiale d'énergie éolienne	11
Contexte actuel en Algérie	11
I.6.2.a Sonelgaz inaugure sa première ferme éolienne	12
I-6-3-Principaux composants d'une éolienne	14
les différents types des turbines éoliennes	15
Les éoliennes à axe verticale	15
les Avantages de la structure à axe vertical	16
les Inconvénients de la structure à axe vertical	16
Les éoliennes à axe horizontale	16
chaîne de conversion de l'énergie éolienne	17
principe de conversion de l'énergie éolienne	17
Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne Avantages	18
Etat de l'art sur les générateurs utilisés dans les éoliennes	19
I.8.1 Systèmes utilisant la machine synchrone	19
1.8.2 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné	19
Les systèmes éoliens utilisant la machine asynchrone	21
Machine asynchrone à cage d'écureuil	21
Machine asynchrone à double stator	23
Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance	24
Conclusion	26
<b>Chapitre II : Etude et modélisation d'une turbine dédiée à un éolien</b>	
Introduction	27
II.1 Modélisation du vent	28
II.1.1 Quelques notions sur le vent	28
II.1.2 Direction et vitesse du vent	29
II.2 Modélisation de la turbine	30
Hypothèses simplificatrices	32
II.2.1 Modèle aérodynamique	33
Considérations préliminaires	33

Equation dynamique de l'arbre	35
II.2.2 L'angle d'inclinaison (blade pitch angle)	39
II.2.2.1 Effort sur une pale d'éolienne	41
II.2.3 Relation du coefficient de puissance avec angle de calage et la vitesse relative	42
II.2.4 Stratégies de commande	42
II.3. Techniques d'extraction du maximum de la puissance	45
II.3. 1 Bilan des puissances	45
II.3. 2 Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse	47
II.3.3 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse	49
II.3.4 Théorie de la MPPT	51
II.3.5 Cas d'études de l'impact de la variation de la vitesse du vent sur l'extraction du maximum de la puissance en fonction de $\beta$	53
II.3.5 1 Résultats de simulations : $\beta$ fixe et v variable	53
II.3.5 2 Résultats de simulations : $\beta$ variable et v variable	56
Conclusion	59
<b><i>Chapitre III : Etude et simulation d'une génératrice avec turbine connectée à un réseau électrique triphasé</i></b>	
Introduction	60
III.1 Description de la machine asynchrone à double alimentation	60
III.2 Principe de fonctionnement de la MADA	61
III.2.1 Modes de fonctionnement d'une machine asynchrone à double alimentation	62
III.3 Modélisation de la MADA dans le référentiel (d, q) lié au champ tournant	64
III.3.1 Modèle de la MADA pour la commande en puissances	65
III.3.2 Commande direct (mode continu)	70
III.3.3 Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation	71
III.4. Modélisation et Contrôle d'un Onduleur de tension & Redresseur MLI	76
III.4.1 Onduleur de tension	76
III.4.2 Redresseur MLI	84
III.5 Validation du model de commande coté machine « continue »	85
III.5.1 Etudes des régulateurs (PI)	85
III.5.2 Résultats de simulations	87
III.6 Conclusion	92
Conclusion générale	93
BIBLIOGRAPHIE	95
Annexes	97

## Liste des figures

### Chapitre I

Figure I.1	Production mondiale d'électricité renouvelable par région	3
Figure 1-2	schéma de principe d'une centrale gravitaire	4
Figure 1-3	Geothermie haute énergie	5
Figure 1-4	schéma de principe d'une usine biomasse	6
Figure 1-5	principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique	8
Figure 1-6	l'évolution des capacités éoliennes dans le monde 2000-2013	11
a)	Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol estimée par Dr. Chellali	12
B)	Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol estimée par Dr. Kasbadji-Merzouk	12
Figure I.8	1 <sup>er</sup> ferme éolienne en Algérie	13
Figure 1-9	schéma de principe d'une éolienne	14
Figure 1-10	Principe composants d'une éolienne	15
Figure 1-11	éolienne à axe verticale	16
Figure 1-12	éolienne à axe horizontal	17
Figure I-13	principe de la conversion de l'énergie éolienne	18
Fig. I.14 (a)	système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné. avec redresseur à diodes, (b) avec convertisseur commande et	20
Figure I-15	Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles	21
Figure 1-16	Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau	22
Figure 1-17	Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné	23
Figure 1-18	Machine asynchrone à double stator	24
Figure 1-19	Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur	25

### Chapitre II

Figure II.1 :	Profil du vent	30
Figure II.2 :	Schéma de la turbine éolienne	33
Figure II.3 :	Les conditions de la vitesse du vent avant et après le convertisseur	34
Figure II.4 :	Modèle mécanique simplifié du multiplicateur	35
Figure II.5 :	Modèle de l'aérogénérateur	38
Figure II.6 :	Eléments caractéristiques d'une pale	40
Figure II.7 :	Directions du vent sur un tronçon de pale	41
Figure II.8 :	Forces appliquées sur un tronçon de pale	41
Figure II.9 :	caractéristiques $C_p=f(\lambda)$ pour cinq valeurs de $\beta$	42
Figure II.10 :	Les quatre zones de fonctionnement de la turbine	43
Figure II.11 :	Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable	44
Figure .II.12 :	Diagramme de conversion de puissance.	46
Figure II.13 :	Stratégies de commande de la turbine étudiée	46
Figure II.14 :	Fonctionnement optimal de la turbine	48
Figure II.15 :	Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse	48
Figure II. 16 :	Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse	51
Figure II.17:	schéma de la commande de l'angle calage	52
Figure II.18 :	profil du vent admissible par la turbine(m/s)	53
Figure II.19 :	coefficient de puissance $C_p$ de la turbine « avec $V_v$ variable ».	53

Figure II.20 :	coefficient $\lambda$ de la turbine « avec $V_v$ variable »	54
Figure II.21 :	couple mécanique de la turbine ( $N.m$ ) « avec $V_v$ variable »	54
Figure II.22 :	puissance mécanique de la turbine ( $watt$ ) « avec $V_v$ variable »	55
Figure II.23 :	vitesse de rotation de la turbine ( $tr/min$ ) « avec $V_v$ variable »	55
Figure II.24 :	l'angle de calage en fonction temps (rad).	56
Figure II.25 :	coefficient de puissance $C_p$ de la turbine.	57
Figure II.26 :	coefficient $\lambda$ de la turbine	57
Figure II.27 :	couple mécanique de la turbine ( $N.m$ )	58
Figure II.28 :	vitesse de rotation de la turbine ( $tr/min$ )	58
Figure II.29 :	puissance mécanique de la turbine ( $watt$ )	59
<b>CHAPITRE III</b>		
Figure III.1 :	Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA	61
Figure III.2 :	Le fonctionnement en mode moteur hypo synchrone	63
Figure III.3 :	Le fonctionnement en mode moteur hyper synchrone	63
Figure III.4 :	Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone	64
Figure III.5 :	Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone	64
Figure III.6 :	La chaine de conversion de l'éolienne basée sur la MADA	65
Figure III.7 :	Représentation simplifié de la MADA	66
Figure III.8 :	Schéma de principe de la commande directe	70
Figure III.9 :	Principe de la commade vectorielle	72
Figure III.10:	Schéma bloc de la commande directe en puissance de la MADA	75
Figure III.11 :	Schéma de l'onduleur triphasé	76
Figure III.12 :	Schéma synoptique d'un MLI	78
Figure III.13 :	M.L.I à échantillonnage naturel	79
Figure III.14 :	bloc de simulation de l'onduleur de tension	80
Figure III.15 :	M.L.I. sinus triangle	82
Figure III.16 :	Injection d'un harmonique de rang 3 .	83
Figure III.17 :	Les tensions : $V_{r1}$ , $V_{r2}$ , $V_{r3}$ et $Pr$	83
Figure III.18 :	Le signal de l'intersection $S1$ entre $V_{r1}$ avec $Pr$	83
Figure III.19:	Système à régulé par PI	86
Figure III.20 :	Schéma d'un Régulateur PI de puissance	86
Figure III.21 :	Schémas d'un régulateur PI de vitesse	86
Figure III.22 :	Commande en boucle fermée de la tension du bus continu avec régulateur PI	87
Figure III.23 :	Schéma bloc du système a régulé de la commande directe	88
Figure III.24 :	Puissance active $P$ (Watt) avec régulateur PI	88
Figure III.25 :	Puissance réactive $Q$ (VAR) avec régulateur PI	89
Figure III.26 :	Vitesse de la MADA $w_m$ (rad/s) avec régulateur PI	89
Figure III.27 :	Le couple électromagnétique $T_e$ (N.m) avec régulateur PI	90
Figure III.28 :	Courants statorique $I_{sa}$ , $I_{sb}$ , $I_{sc}$ (A) avec régulateur PI	90
Figure III.29 :	Courants rotorique $I_{ra}$ , $I_{rb}$ , $I_{rc}$ (A) avec régulateur PI.	91

### Liste des tableaux

Tableau II.1	Echelle Beaufort	29
--------------	------------------	----

## Liste de notations et symboles :

$X^*$	: Grandeur de référence
$\hat{X}$	: Grandeur estimée
A, B, C	: Indices des phases statorique
a, b, c	: Indices des phases rotorique
$(\alpha, \beta)$	: Axes correspondant au référentiel lie au stator.
$(d, q)$	: Axes correspondant au référentiel lie au champ tournant.
s, r	: Indice relatif au stator et rotor respectivement
[P]	: Matrice de Park
[Vs]	: Vecteur tension statorique
[Vr]	: Vecteur tension rotorique
[Is]	: Vecteur courant statorique
[Ir]	: Vecteur courant rotorique
[Φs]	: Vecteur flux statorique
[Φr]	: Vecteur flux rotorique
M [H]	: Inductance mutuelle statorique-rotorique
J [kg.m <sup>2</sup> ]	: Moment d'inertie des masses tournantes
f [N.m.sec/rad]	: Coefficient de frottement visqueux
P	: Nombre de paire de pôles
Ls [H]	: Inductance cyclique propre du stator (ls -Ms)
Lr [H]	: Inductance cyclique propre du rotor (lr -Mr)
M [H]	: Inductance cyclique mutuelle
Rs [Ω]	: Résistance statorique
Rr [Ω]	: Résistance rotorique
Ts (Ls/Rs)	: Constante du temps statorique
Tr (Lr/Rr)	: Constante du temps rotorique
$\sigma = (1 - (M^2 / (Ls \cdot Lr)))$	: Coefficient de dispersion de Blondel
Ω [rad/sec]	: Vitesse de rotation mécanique
ω [rad/sec]	: Pulsation de rotation électrique ( $\omega = p\Omega$ )
ω <sub>s</sub> [rad/sec]	: Pulsation électrique statorique
ω <sub>r</sub> [rad/sec]	: Pulsation de glissement ( $\omega_s - \omega$ )
θ <sub>obc</sub>	: Angle d'observation de la matrice de PARK
Cem [N m]	: Couple électromagnétique
Cr [N m]	: Couple résistant imposé à l'arbre de la machine

$S$	: Opérateur dérivé de LAPLACE.
$\varepsilon$	: Coefficient d'amortissement.
$\lambda$	: Vitesse relative
$\omega_n$	: Pulsation du système.
$\Phi_{ref}$	: Flux de référence.
$\Omega_{ref}$	: Vitesse de référence.
$[X]$	: Matrice d'état
$[A]$	: Matrice d'évolution d'état du système.
$[B]$	: Matrice de système de commande.
$[U]$	: Matrice de commande.
$K_p, K_i$	: Coefficients de proportionnalité et d'intégration
MAS	: Machine Asynchrone
MLI	: Modulation de Largeur d'Impulsion
CVD	: Commande Vectorielle Direct
MRAS	: Système Adaptatif avec Modèle de Référence

# *Introduction Générale*

La consommation mondiale d'énergie ne cesse de croître, posant des questions cruciales sur le problème du réchauffement climatique, dû aux gaz à effet de serre, et sur l'épuisement prochain des ressources fossiles.

Suite à cette prise de conscience, un développement économique respectueux de l'environnement s'avère absolument nécessaire.

Les énergies renouvelables sont propres et constituent une solution alternative pour subvenir aux besoins de la société actuelle. Longtemps négligées ces énergies reprennent la place qui leur est dû, grâce aux recherches et études qui se font de plus en plus diversifiées et pluridisciplinaires.

Dans ce contexte général, cette présente étude s'intéresse à la filière éolienne, qui semble être l'une des plus prometteuses.

L'option du recours aux énergies renouvelables a pris un essor certain en Algérie, elle reste à être matérialisée par des projets importants et concrets.

Des centrales hybrides solaire éolien peuvent être envisagées, vu le potentiel solaire très important dont nous disposons, le pompage éolien peut aussi être très rentable, non seulement dans la région très ventée d'Adrar, mais aussi à travers toute la steppe Algérienne.

Notre travail s'intègre dans le domaine d'éolienne, nous allons dans ce mémoire aborder la modélisation et la simulation d'une chaîne de conversion éolienne de puissance à axe horizontal

Le présent mémoire comporte trois chapitres :

Le premier chapitre, nous discuterons le développement de l'énergie renouvelable dans le monde et leurs principes de fonctionnement, notamment les énergies éoliennes, principaux composants et leurs chaînes de conversion et sont aspects économiques.

Le deuxième chapitre traitera exclusivement la turbine, par la présentation de sa modélisation qui tiendra compte à la fois des vitesses du vent constant ou variable ainsi que l'angle de calage des pâles. Une série de simulation sera présentée pour mettre en évidence les performances de notre turbine qui devra être utilisé dans le chapitre suivant.

Le troisième chapitre mettra en évidence les performances d'une génératrice à double alimentation avec turbine intégrant un type de régulateur PI et ce en mode continu.

## *Chapitre I :*

# *Généralité sur les énergies renouvelables*

**INTRODUCTION :**

Les énergies renouvelables sont propres et inépuisables. Et vu que les autres sources d'énergie sont à coût élevé, plusieurs pays ont encouragé les chercheurs d'étudier et développer des systèmes de conversion d'énergie renouvelables (énergie solaire, énergie éolienne, hydraulique, géothermique .....etc .

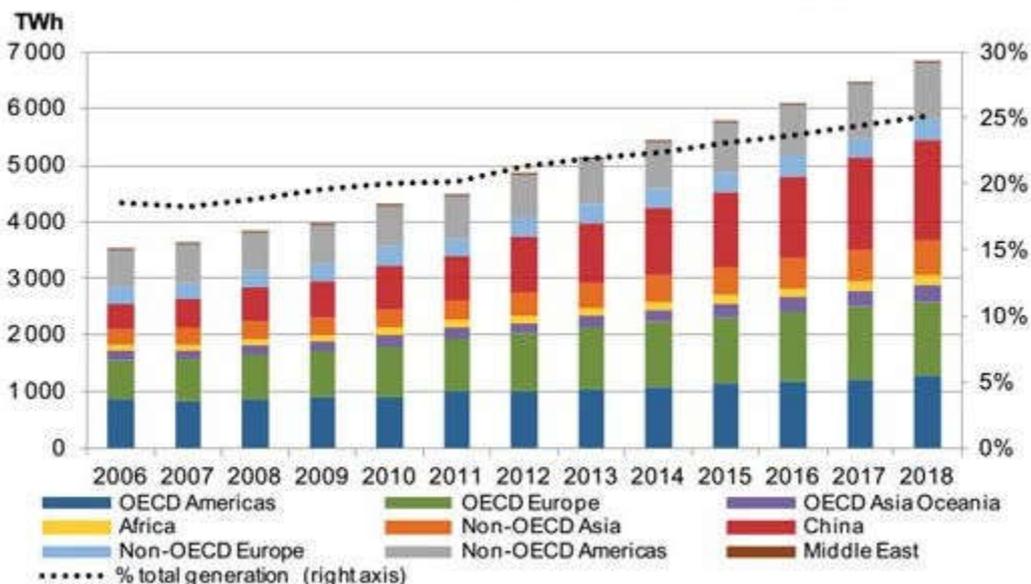
Face à l'épuisement programmé des énergies fossiles et à leur impact négatif sur l'environnement, les énergies renouvelables s'imposent comme la solution d'avenir pour satisfaire de façon durable les besoins énergétiques mondiaux.

L'énergie éolienne est une source d'énergie 100% propre (elle est développée par de très nombreux pays et connaît une croissance très importante + 30 % par an en moyenne depuis 10 ans.

**Notions et principe sur les énergies renouvelables :**

On entend par énergie renouvelable, des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les Energies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée.

Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie biomasse et l'énergie hydroélectrique, sont des solutions prometteuses pour concurrencer les sources d'énergies de masse telle que l'énergie fossile et nucléaire.



**Figure I.1 Production mondiale d'électricité renouvelable par région [1]**

**L'énergie hydraulique (ou hydrau-électricité) :**

Cette énergie est produite par une chute d'eau à deux niveaux, l'un étant plus élevé que l'autre, le courant d'eau fait tourner les turbines dont l'énergie alimente les générateurs électriques.

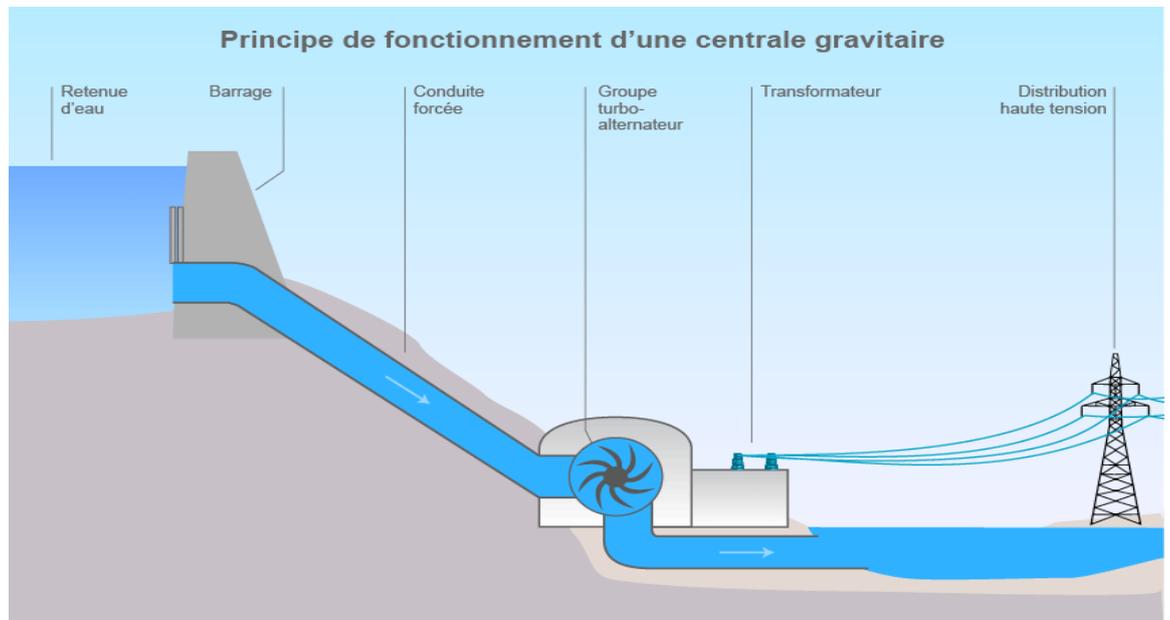


Figure I -2 : schéma de principe d'une centrale gravitaire

✓ Avantage :

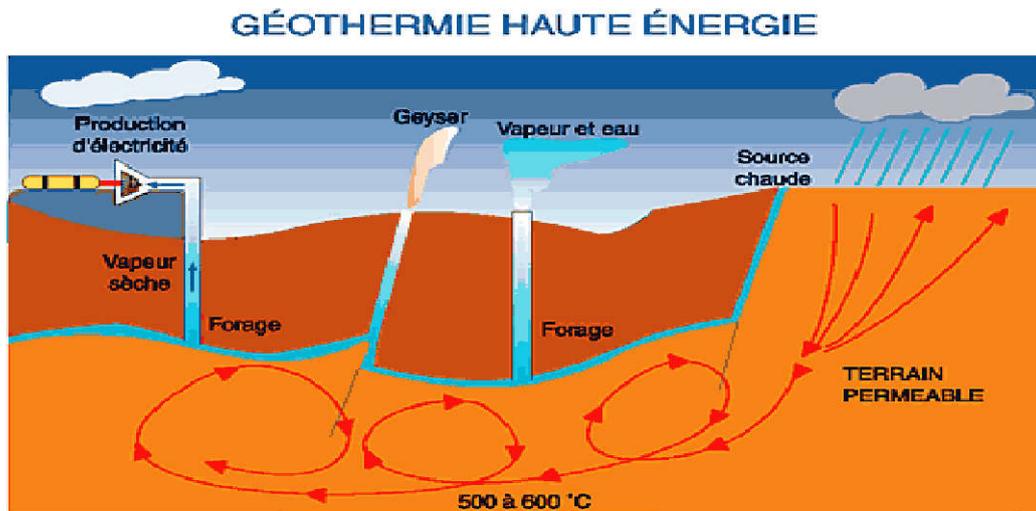
- source d'énergie renouvelable
- production d'énergie locale
- contrôle des inondations
- création d'une réserve d'eau pour diverses utilisations

✓ Inconvénients :

- bloque les passes à poissons
- modifie l'habitat aquatique (ex : débit, température)
- dégrade la qualité d'eau (accumulation de contaminants)

**Energie de la géothermie :**

Une énergie produite grâce à la chaleur de la terre, elle est contenue à l'intérieur de réservoirs souterrains de vapeur d'eau chaude et des roches chaudes, est utilisée comme ressource générant de l'électricité, l'eau chaude ou la vapeur extraite des réservoirs géothermiques de la croûte de la terre, fait tourner les turbines électriques qui alimentent les générateurs pour produire de l'électricité.



**Figure I -3 : Géothermie haute énergie**

**a) Les avantages**

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent), ni même de la disponibilité d'un substrat, comme c'est le cas de biomasse.

**b) les inconvénients :**

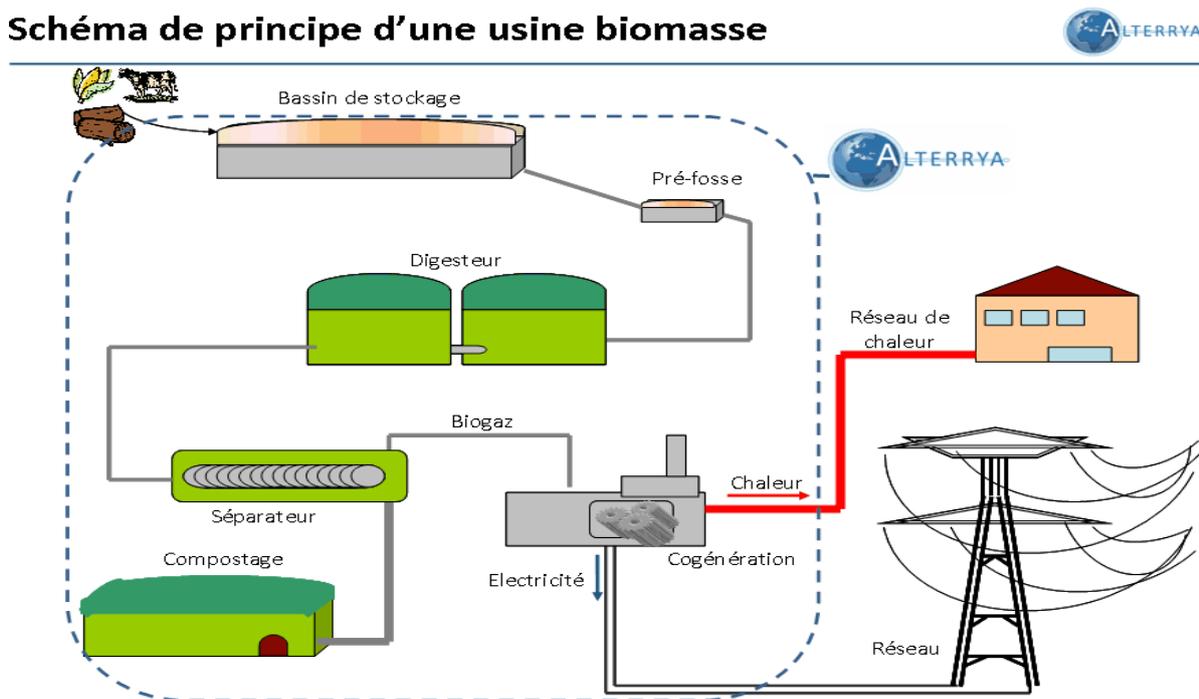
Selon la nature du sol, les coûts de forage peuvent être très élevés. Mais la mise en place d'une installation géothermique correspond à un investissement important, le coût d'exploitation est quasiment nul.

Risques de pollution existants sont rejetés à la surface du sol l'eau extraite si celle-ci contient des métaux lourds. Ce risque est évité lorsqu'elle est réinjectée en sous-sol.

**L'énergie Biomasse :**

Energie produite grâce aux déchets et grâce à la combustion des matières organiques d'origine végétale, animale ou fongique, ou après méthanisation (biogaz), et aussi après de nouvelles transformations chimique.

**Schéma de principe d'une usine biomasse**



**Figure I -4: schéma de principe d'une usine biomasse**

**a) Les Avantages :**

C'est une énergie qui émet peu de gaz à effet de serre et qui peut être stockée. Concernant particulièrement le bois-énergie, il y a une large disponibilité de la ressource et le prix du bois de chauffage ne suit pas le cours du pétrole.

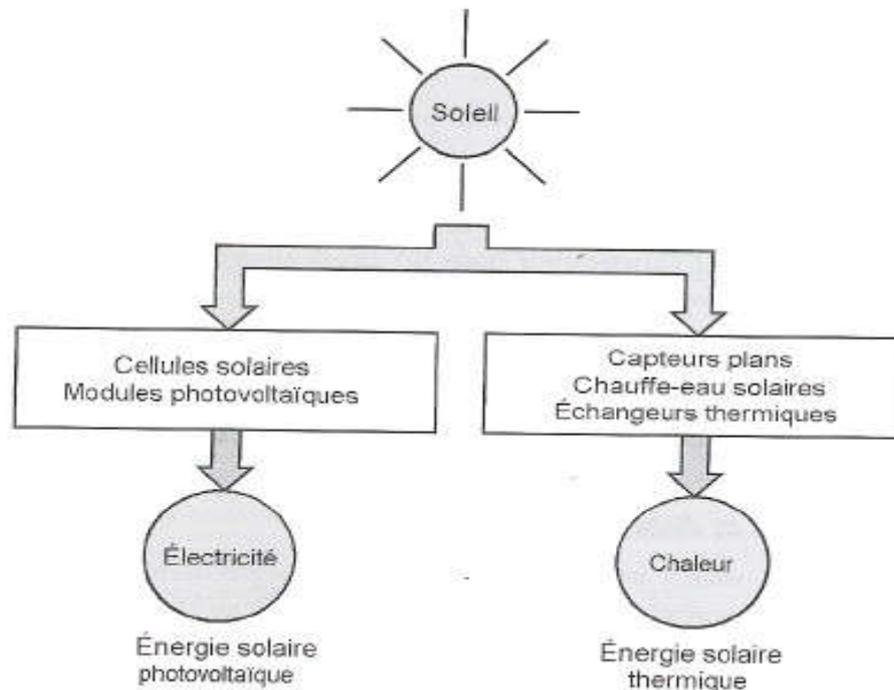
**b) Les Inconvénients :**

Elle ne peut avoir qu'un apport limité car le recours intensif à la biomasse entraînerait des impacts négatifs sur l'environnement tels que des phénomènes de déforestations (en cas d'exploitation intensive du bois-énergie), d'érosions des sols, de pollution des sols eaux (en cas de production intensive de biocarburant)

**L'énergie solaire :**

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Bien sûr, le soleil nous chauffe et nous éclaire. Alors cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires.

Alors on distingue deux types de l'énergie solaire : l'énergie à effet thermique, et à l'effet photovoltaïque.



**I.5-a L'énergie solaire thermique :**

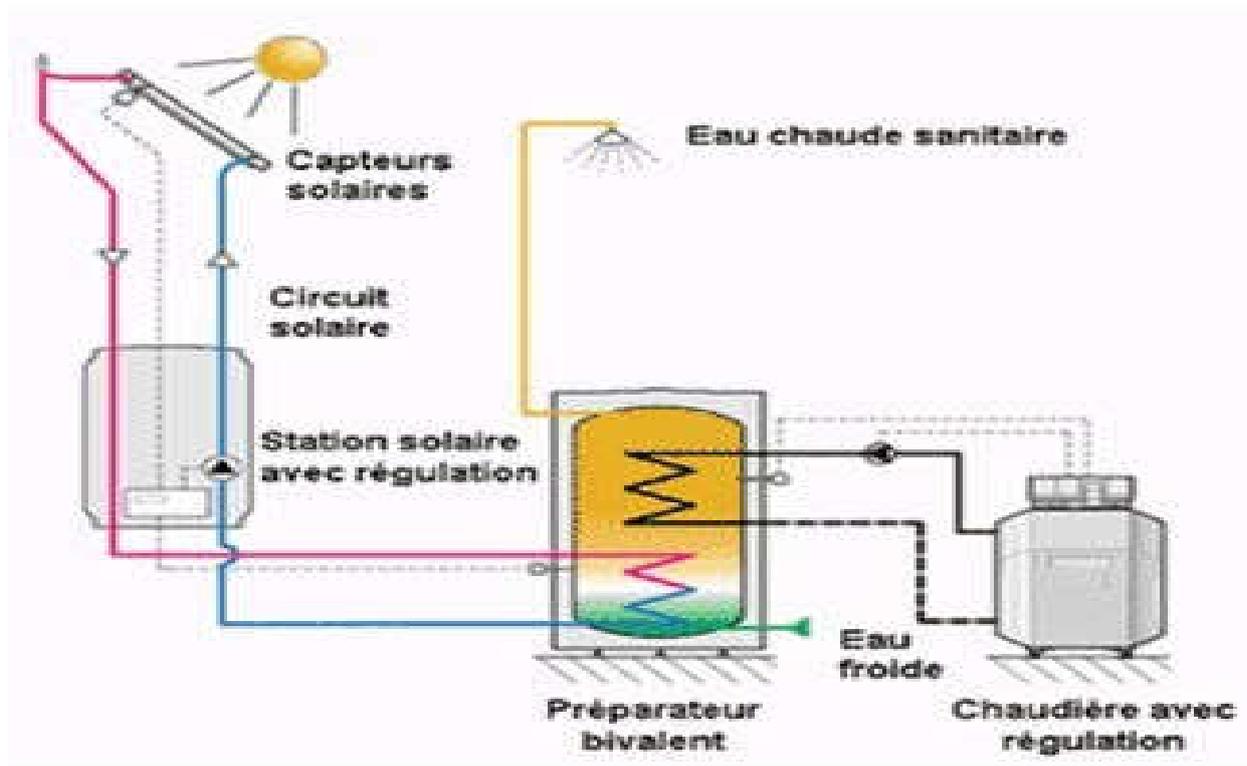
Le principe consiste à capter le rayonnement solaire et à le stocker dans le cas des systèmes passifs (véranda, serre, façade vitrée) , s'il s'agit de système actif, à redistribuer cette énergie par le biais d'un fluide caloporteur qui peut être de l'eau, un liquide antigel ou même de l'air.

Les formes d'utilisation finale de cette énergie sont :

- A basse température (30à100°C) Eau chaude sanitaire, chauffage des locaux, machines.
- A moyenne température (100à 500°C) Séchage, cuisson, stérilisation, distillation,.....
- A haute température (500 à 1800°C) Verreries, cimenteries, métallurgie, traitements chimiques,

Pour atteindre des températures élevées, on utilise des héliostats (miroirs orientables) dans fours solaires (comme à odeillo en France).

Plus la température à obtenir est élevée, plus le procédé et la technologie de transformation sont complexes et le prix élevé



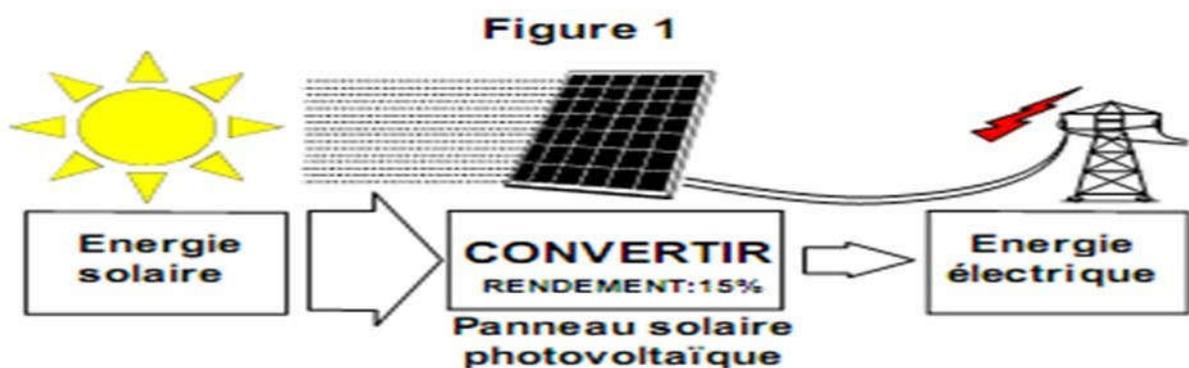
**Figure I -5: principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique**

**I.5-b L'énergie solaire à effet photovoltaïque :****I.5-b-1-Principe :**

Le principe de la conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique est issu de la découverte par Becquerel en 1839 de l'effet photovoltaïque. le mot photovoltaïque vient du mot « photo » (du Grec « phos » qui signifie lumière) et du mot « volt »(patronyme du physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité.

Il s'agit de transformer l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique en utilisant un effet physique de certains matériaux : l'effet photovoltaïque.

Les premières cellules solaires à base de silicium ont vu le jour au milieu des années 1950 et utilisent cet effet photovoltaïque. Lorsque ces cellules solaires illuminées sont raccordées à un circuit extérieur, un courant est alors débité dans ce circuit et l'énergie lumineuse est convertie en électricité.

**a) Les avantages :**

- Les installations bien conçues sont fiables, même dans des conditions climatiques très rudes.
- La durée de vie des modules photovoltaïques dépasse 20 ans, celle des batteries atteint 8 à 10 ans.
- Les systèmes peuvent être conçus pour des puissances très variables (de 20 Wc pour un système de signalisation routière jusqu'à 1 MWc pour une centrale connectée au réseau.
- Le montage est aisé et rapide. Les panneaux sont relativement légers (10 à 15 kg).

- Le coût de fonctionnement est faible. La maintenance est limitée à une ou deux visites annuelles effectuées par un professionnel.

**b) Les inconvénients :**

- Les seules contraintes sont l'orientation, l'inclinaison et leur disposition par rapport aux obstacles éventuels.
- Les panneaux doivent être orientés en direction de l'équateur. Leur inclinaison par rapport à l'horizontale doit être adaptée à la saison d'utilisation la plus défavorable pour les systèmes autonomes (elle a moins d'importance sur les systèmes connectés au réseau, c'est pourquoi on peut trouver des capteurs en façade ou en toiture à faible pente).
- Les investissements sont élevés et le recours à cette technologie impose une analyse très fine des besoins et l'utilisation impérative d'appareils énergétiquement performants.

**L'énergie éolienne : (qui est l'objet de notre étude)**

On utilise l'énergie éolienne depuis au moins deux mille ans. En Mésopotamie, en 1700 avant J.C environ, l'énergie éolienne était utilisée à des fins d'irrigation et pour moulinier le grain.

Les pompes éoliennes mécaniques étaient en grande partie utilisées au XIXe siècle pour fournir de l'énergie à des fins d'irrigation, de drainage, etc. et ont marqué le paysage de nombreux pays.

**Production mondiale d'énergie éolienne :**

L'utilisation moderne de l'énergie éolienne est aujourd'hui pratiquement réservée à la production d'électricité. La découverte capitale de la puissance éolienne se fit avec la crise du pétrole en 1973, quand la montée en flèche des prix du pétrole passait de 12 à 35 US\$.

Soudainement, les pays de l'OCDE voulurent devenir plus indépendants des importations de pétrole et se tournèrent vers le développement de l'énergie éolienne, et ce pratiquement exclusivement pour la production d'électricité. Vingt ans plus tard, la technologie en matière d'éoliennes a mûri et les éoliennes sont passées de 10 kW à plus de 3 000 kW [2].

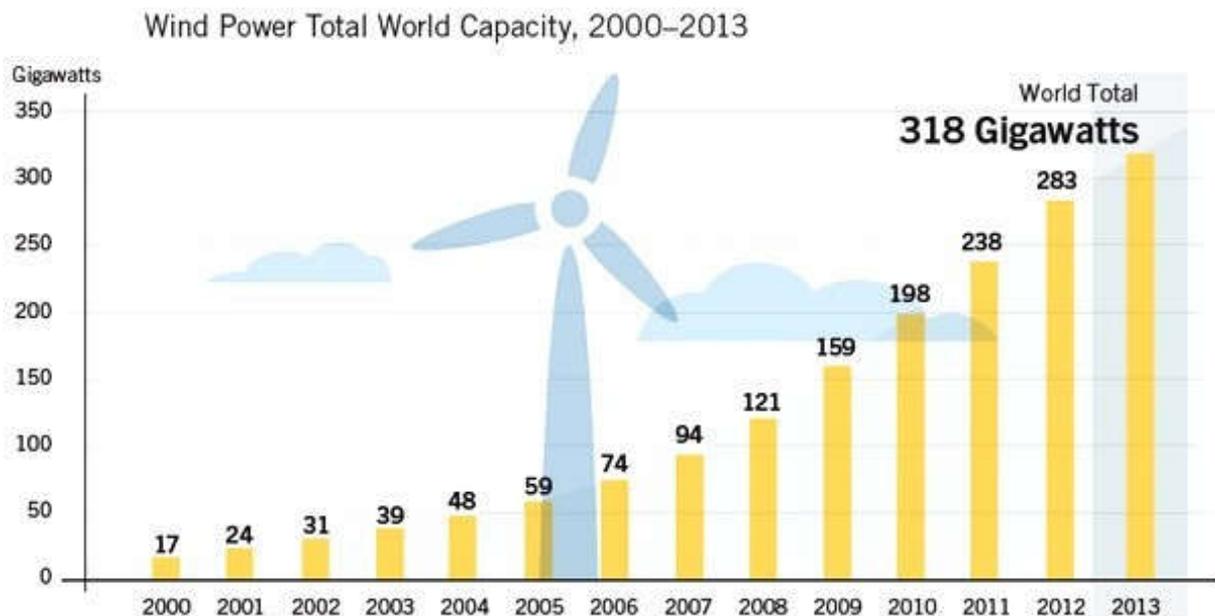


Figure I -6: l'évolution des capacités éoliennes dans le monde 2000-2013 [2]

#### Contexte actuel en Algérie :

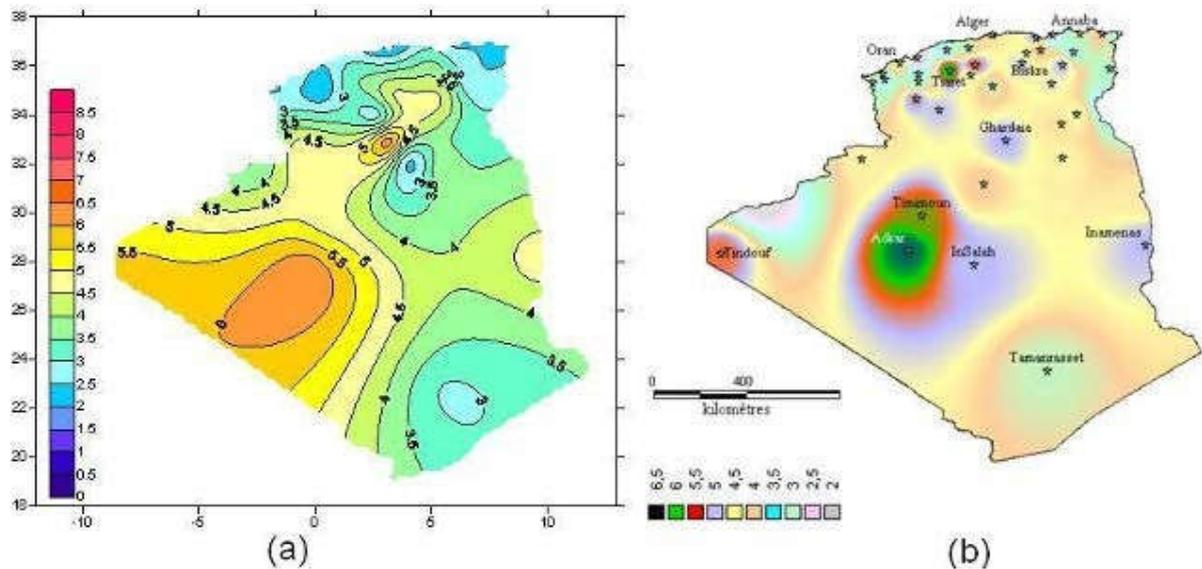
L'Algérie à l'instar des autres pays essaie de percer dans le domaine des énergies renouvelables et l'énergie éolienne en particulier.

Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie.

Cette représentation de la vitesse sous forme de carte, a deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes régions avec de bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne. Le second est de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers le pays.[3] La carte représentée dans la figure (I.25) montre que le sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar.

Concernant le nord, la vitesse moyenne est globalement peu élevée. Il est noté cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El kheiter ainsi que dans la région délimitée Bejaia au nord et Biskra au sud. Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qui ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. La réalisation d'une carte saisonnière a montré clairement que l'automne et l'hiver sont moins

ventée. Néanmoins, il faut remarquer que la région de Tiaret fait l'exception avec une vitesse plus faible en été qu'en hiver.



(a) Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol estimée par Dr. Chellali

(b) Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol estimée par Dr. Kasbadji-Merzouk

Figure I.7 : carte du potentiel éolien en Algérie [3]

Cette carte permet de cibler les zones les mieux ventées pour installer des parcs éoliens en vue d'alimenter des régions isolées pour avoir une autonomie énergétique par rapport au réseau national déjà très chargé. Des projets de ce genre sont en phase d'étude et d'autres commencent à voir le jour tel que la réalisation de la première ferme éolienne à Adrar d'une puissance de 10MW.

**I.6.2.a Sonelgaz inaugure sa première ferme éolienne de 10 MW à Adrar:**

**Figure I.8 : 11er ferme éolienne en Algérie [4]**

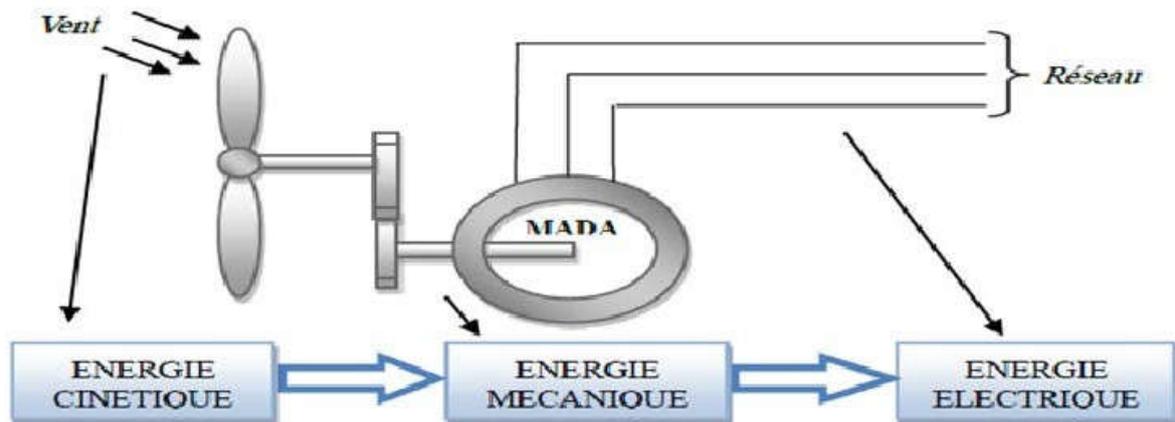
Sonelgaz a mis en service sa première ferme éolienne d'Adrar d'une capacité de 10 mégawatts qui servira aussi de projet pilote pour le plan éolien du gouvernement de 420 MW à l'horizon 2024[4]. Constituée de 12 éoliennes d'une puissance unitaire de 0.85 MW chacune (pour une capacité globale de 10 mégawatts), cette ferme est implantée sur une superficie de 30 hectares dans la zone de Kabertène à 72 km au nord du chef-lieu de la wilaya d'Adrar, a nécessité près de 32 mois travaux pour un coût global de 2,8 milliards de dinars [4].

Première du genre à l'échelle nationale, cette nouvelle centrale de production d'électricité fait partie d'un vaste plan de projets de génération de 22 GW, d'énergie renouvelable à l'horizon 2030 dont 1,7 GW en éolien.

Une étude du consortium industriel pour l'électricité des déserts, le promoteur du projet Desrtec, estime que l'Algérie dispose d'un potentiel énorme en énergie éolienne.

La société d'électricité et de l'énergie renouvelable (SKTM), annonce qu'environ 40 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale sera d'origine renouvelable à l'horizon 2030.

La ressource éolienne provient du 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 des autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Un système éolien ou une éolienne est composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique.



**Figure I -9 : schéma de principe d'une éolienne**

### I-6-3-Principaux composants d'une éolienne

\*Le mât : Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique qui supporte la nacelle et le rotor de la turbine. Il est important qu'il soit assez élevé (40 à 60 m de hauteur pour une éolienne de 500 kW) pour exploiter les vents les plus forts en altitude. À l'intérieur de ceux-ci se trouve une échelle qui permet d'accéder à la nacelle pour l'entretien.

\*Les pales : Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

\*La nacelle : Elle rassemble tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres, multiplicateur, roulement, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone, les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent).

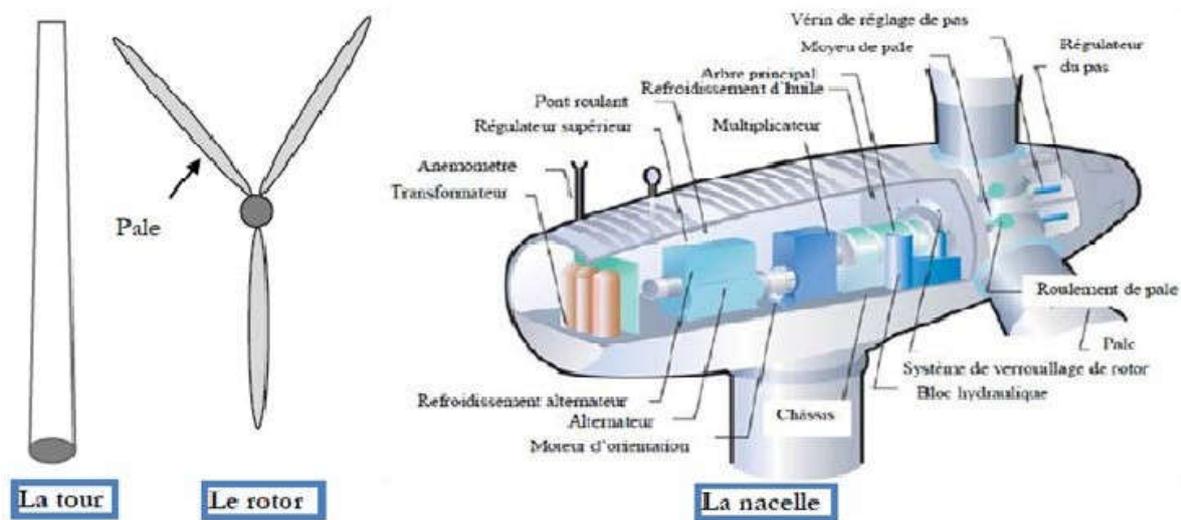


Figure I -10: Principe composants d'une éolienne

**Les différents types des turbines éoliennes :**

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui diffèrent essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéro-turbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient :

- Les éoliennes à axe verticale.
- Les éoliennes à axe horizontale

**Les éoliennes à axe verticale :**

Elles ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses technologies ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation ; le rotor de Savonius et le rotor de Darrieus. De nos jours, ce type d'éoliennes est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elles présentent les avantages et les inconvénients suivants :



**Figure I -11: éolienne à axe verticale**

**Les Avantages de la structure à axe vertical :**

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

**les Inconvénients de la structure à axe vertical :**

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

**Les éoliennes à axe horizontale :**

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, les tripales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales.

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe verticale, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important.



**Figure I -12: éolienne à axe horizontal**

**Chaîne de conversion de l'énergie éolienne :**

Pour obtenir de l'électricité à partir du vent, on retrouve dans les différentes configurations les mêmes éléments de base à savoir :

- Une turbine qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique.
- Une transmission mécanique.
- Une génératrice.
- Un système de liaison électrique.

Selon l'utilisation de l'éolienne, certaines de ces parties sont plus ou moins développées, on distingue deux grandes familles d'éoliennes:

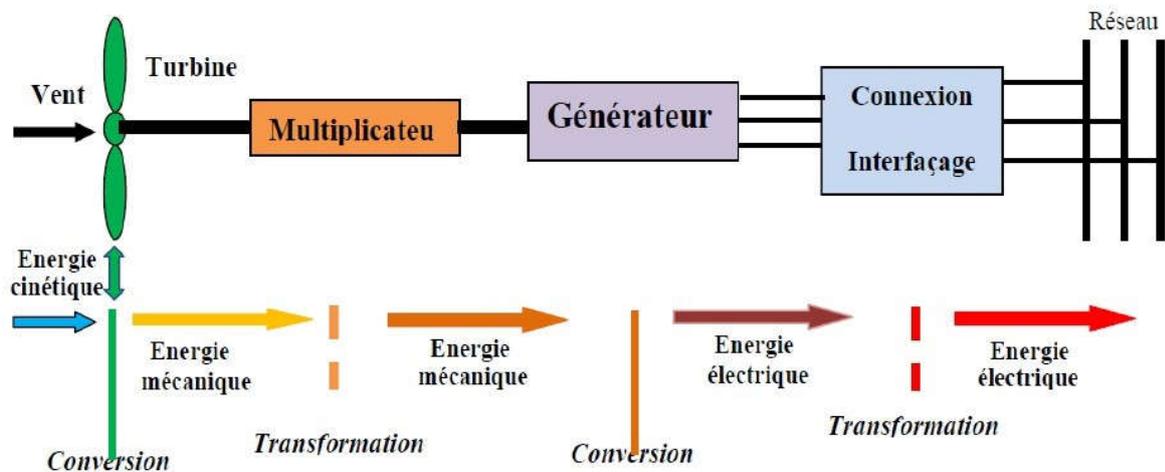
- Les éoliennes raccordées au réseau.
- Les éoliennes autonomes.

**Principe de conversion de l'énergie éolienne :**

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un générateur qui produit de l'électricité. La vitesse de rotation du rotor doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tr/mn pour une machine à 2 parties de pôles, vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur. Des convertisseurs électroniques de vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur.

Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée, tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent.

La tension de l'électricité produite par générateur est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mat. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public.



**Figure I-13 : principe de la conversion de l'énergie éolienne**

#### Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est-à-dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées.
- L'énergie éolienne est une énergie propre.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace. L'énergie éolienne possède d'autre part des atouts économiques certains.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont minimales.

**Inconvénients**

- La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour le raccordement au réseau.
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classiques surtout sur les sites moins ventés.
- Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe.

**Etat de l'art sur les générateurs utilisés dans les éoliennes :**

La technologie des aérogénérateurs a énormément évolué ces 20 dernières années entraînant une spécialisation des différents types d'éolienne. Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne.

Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites puissances (< 20 kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2 MW le générateur asynchrone est plus courant et économique.

**1.8.1 Systèmes utilisant la machine synchrone :**

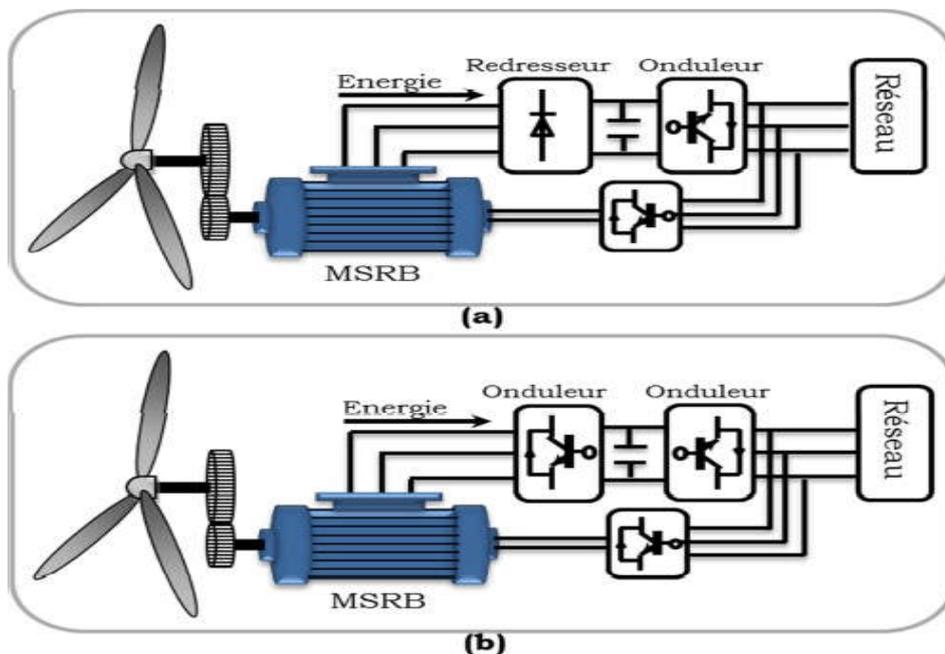
L'avantage du générateur synchrone sur le générateur asynchrone est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique du générateur synchrone peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut être utilisé pour les applications d'entraînement direct qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses. Le générateur synchrone est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique, lequel permet un fonctionnement à vitesse variable. Pour des unités de petites tailles, le générateur à aimants permanents est plus simple et moins coûteux. Au-delà de 20 kW (environ), le générateur synchrone est plus coûteux et complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente.

**1.8.2 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné**

Ce type de machine est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité. Le champ créé par la rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si la génératrice est directement connectée au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement proportionnelle à la fréquence du réseau. Ces machines présentent aussi 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 la turbine. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées avec un entraînement direct sur les turbines éoliennes. Ceci pose le problème d'adaptation de ce type de machines avec le système éolien pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau.

En conséquence de cette grande rigidité de la connexion génératrice - réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau, et nécessitent une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau (Fig. I.28) ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [3]. Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier du système de contacts glissants au rotor. Le circuit d'excitation est assuré par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau.



**Fig. I.14:** système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné. (a) avec redresseur à diodes, (b) avec convertisseur commande et.

### Les systèmes éoliens utilisant la machine asynchrone :

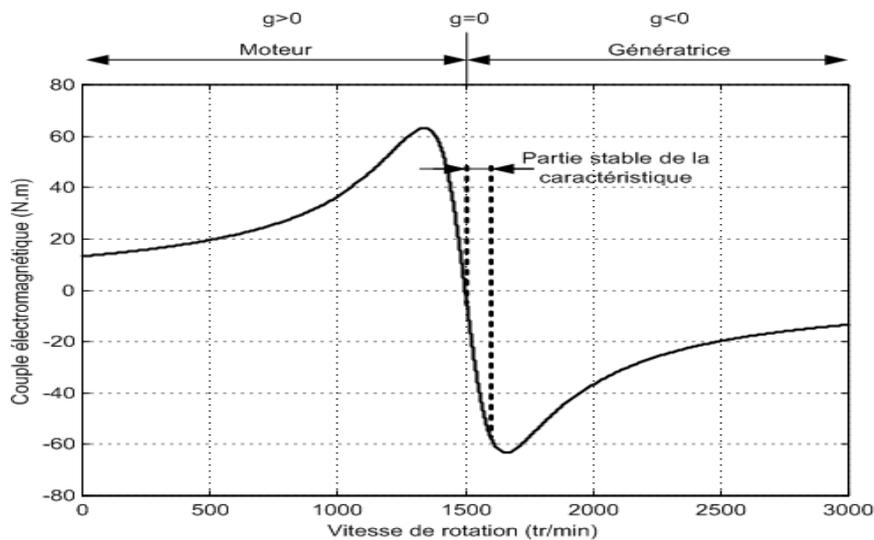
Nous dresserons une liste non exhaustive de système de conversion de l'énergie éolienne utilisant la machine asynchrone. Nous avons subdivisé ces systèmes en deux grandes familles ; il s'agit des éoliennes connectées aux réseaux et celle fonctionnant au site isolé.

Nous avons également voulu distinguer entre éoliennes fonctionnant à vitesse fixe de celles fonctionnant à vitesse variable.

### Machine asynchrone à cage d'écureuil

C'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde.

La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la Figure I-15[5].



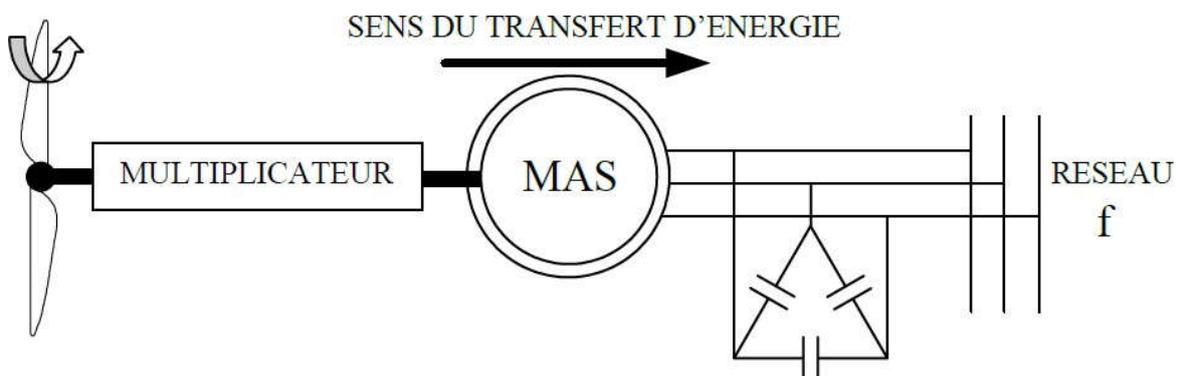
**Figure I-15:** Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point  $g=0$ ), dans le cas de la caractéristique ci-dessus, la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 trs/min

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (Figure 1-16)

. La machine à un nombre de pair de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs. La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine.

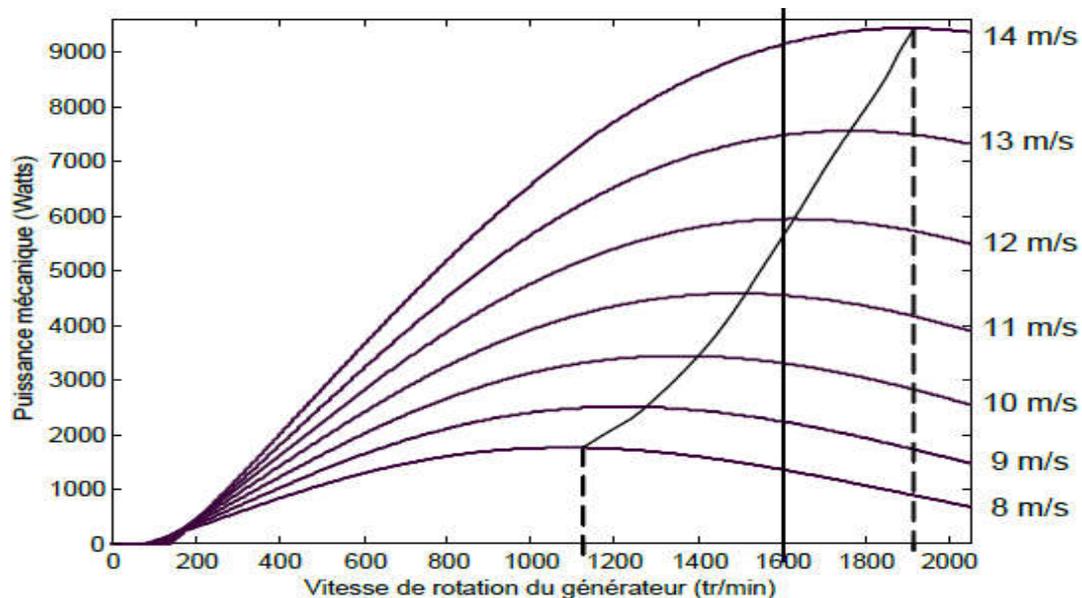
Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau. Celui-ci peut-être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la Figure 1-16 qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.



**Figure I -16 : Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau**

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et il n'exploite pas la totalité de la puissance théoriquement disponible pour les vitesses de vent élevées.

En effet le système est conçu pour fonctionner sur la partie gauche du réseau de courbes de la Figure 1-17, là où celles-ci sont le plus rapprochées les unes des autres.



**Figure I -17 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné**

La machine est alors naturellement protégée contre les surcharges mais l'efficacité de l'éolienne est fortement réduite. De plus les variations du couple mécanique sont fréquentes puisque le système d'orientation des pales est souvent en action pour pallier les variations de vitesse de vent. Ces variations de couple produisent de brusques variations du courant débité sur le réseau entraînant ainsi des perturbations.

### **Machine asynchrone à double stator**

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (Figure 1-18)

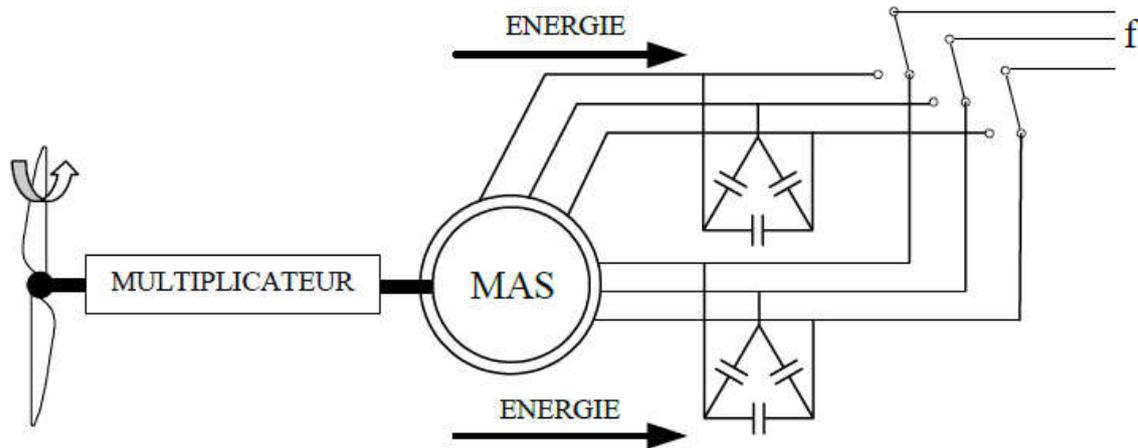
Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent.

Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées [6].

Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les

petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées.

La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble.



**Figure I -18 : Machine asynchrone à double stator**

### **Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance :**

Le dispositif de base est représenté sur la Figure 1-19. Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable sans limite physique théorique.

En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée et transformée en tension continue.

Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire. La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne. Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés pour la totalité de cette puissance échangée entre la machine et le réseau.

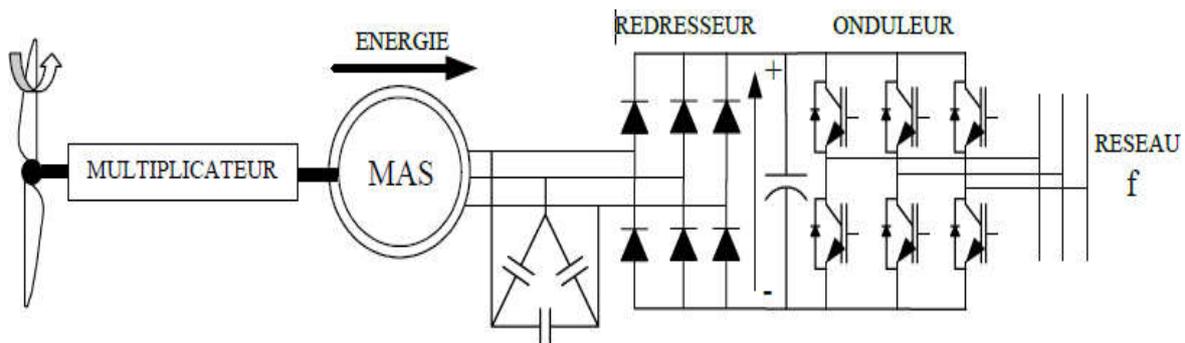
Ils représentent donc un coût important, des pertes non négligeables (jusqu'à 3% de la puissance nominale de la machine) et entraînent des perturbations qui nuisent au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée.

De plus, la présence des capacités est indispensable pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. Cette énergie ne peut pas être fournie par le réseau car le redresseur est unidirectionnel. Il peut être éventuellement remplacé par un redresseur MLI à base d'IGBT dont la structure est semblable à celle de l'onduleur.

Dans ce cas, le transfert de puissance réactive est contrôlable et se fait du bus continu vers la machine et le transfert de puissance active est identique au cas du redresseur simple.

Cette solution alourdit toutefois le dispositif en terme de coût et de complexité de mise en œuvre, de plus, les enroulements statoriques du moteur sont alors soumis à des  $dv/dt$  importants qui peuvent réduire leur durée de vie [7].

L'ensemble de ces inconvénients n'ont pas permis un développement industriel important de ce dispositif.



**Figure I -19 : Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur**

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous nous sommes présenté les différents types d'énergies renouvelables et les différents éoliens est leur principe de fonctionnement d'une manière générale ainsi que les différentes structures.

La seconde partie du chapitre présente quelque système de conversion de l'énergie éolienne utilisant la machine asynchrone.

Il s'agit des ensembles machines asynchrones associées à leurs convertisseurs, adaptable à un système éolien fonctionnant

## **Chapitre II :**

*Etude et modélisation d'une turbine  
dédiée à un éolien*

**Introduction :**

L'énergie éolienne est devenue l'une des sources énergétique des plus prometteuses, en termes d'écologie, de compétitivité, de champ d'application, de création d'emplois et de richesses [8].

Depuis le début le dix-huitième siècle, l'énergie cinétique du vent est convertie directement en énergie mécanique. Employé principalement dans les anciens moulins à vent ou pour actionner des pompes. Mais de nos jours, cette énergie est transformée en énergie électrique et ce, par l'emploi d'aérogénérateurs.

L'intérêt croissant porté aux énergies renouvelable résulte d'une part, en la protection de l'environnement et à l'économie des combustibles fossiles, d'autre part, l'évolution des technologies rend la conversion de cette énergie de plus en plus rentable et donc son utilisation devient économiquement compétitive par rapport aux sources traditionnelles de même puissance [9]

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la validation de notre modèle de turbine pour l'intégrée ensuite à notre aérogénérateur dans la suite de notre travail.

Dans une premier partie, on définira le profile du vent que nous devons utiliser, suivi par la modélisation de notre turbine en tenant compte des différents paramètres qui la constitue. Notre travail de validation débutera par une étude du comportement de notre turbine pour un angle de calage «  $\beta$  » constant et vitesse du vent variable.

La deuxième partie, est consacré à l'utilisation d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) avec et sans asservissement de vitesse dans le but de contrôler la puissance mécanique délivrée par la turbine de sorte à extraire le maximum de puissance et ce quelque soit le vent qui lui est appliqué.

**II.1 Modélisation du vent :**

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. Celui-ci peut être très complexes qui rendent compte de sa phénoménologie turbulente [10].

La modélisation du vent est primordiale que ce soit pour :

- définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne.
- définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales.
- évaluer le potentiel d'énergie utilisable.
- fournir une aide pour l'implantation des machines

La définition du modèle nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de l'an (saison) concernée par l'étude. A titre d'exemple, le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui le présente comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques, il est donné par l'équation suivant [10].

$$V_v(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \sin(\omega_k t) \quad (\text{II. 2})$$

Avec :

A : la valeur moyenne de la vitesse du vent

$a_k$  : Amplitude de l'harmonique de l'ordre  $k$

$\omega_k$  : Pulsation de l'harmonique de l'ordre  $k$

$i$  : le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent

**II.1.1 Quelques notions sur le vent :**

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette énergie est renouvelable, non dégradée et non polluante. La vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période l'hiver et au niveau des mers (offshore). Le vent est défini par sa direction et sa vitesse.

**II.1.2 Direction et vitesse du vent :**

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et grandes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre [11][10].

Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents. La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Il en existe deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression) [11]. Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories dont nous citons quelques unes au tableau II.1.

**Tableau II.1 : Echelle Beaufort [11]**

Degrés Beaufort	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse du vent (km/h)	Description générale	Pression sur surface plane (daN/m <sup>2</sup> )
0	0 à 0.4	< 1	Calme	
3	3.5 à 5.5	12 à 19	Petite brise	3.2 (5 m/s)
4	5.5 à 8	20 à 28	Jolie brise	6.4 (7 m/s)
6	11.4 à 13.9	39 à 49	Vent frais	22 (13 m/s)
8	17.4 à 20.4	62 à 74	Coup de vent	52 (20 m/s)
11	28.4 à 32.5	103 à 117	Violente tempête	117 (30 m/s)
17	54.1 à 60	202 à 220	Cyclone	470 (60 m/s)

En effet, pour implanter un parc éolien, la prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger de la capacité de production d'une centrale éolienne. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année pour déterminer la possibilité ou non d'implanter le parc. Non seulement il faut connaître la vitesse moyenne du vent, mais aussi sa variation en fonction de l'altitude.

Les vents les plus intéressants qui donnent finalement le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10 m/s [5].

Le profile du vent ci-dessous sera employé dans la suite du document, voir figure II.1.

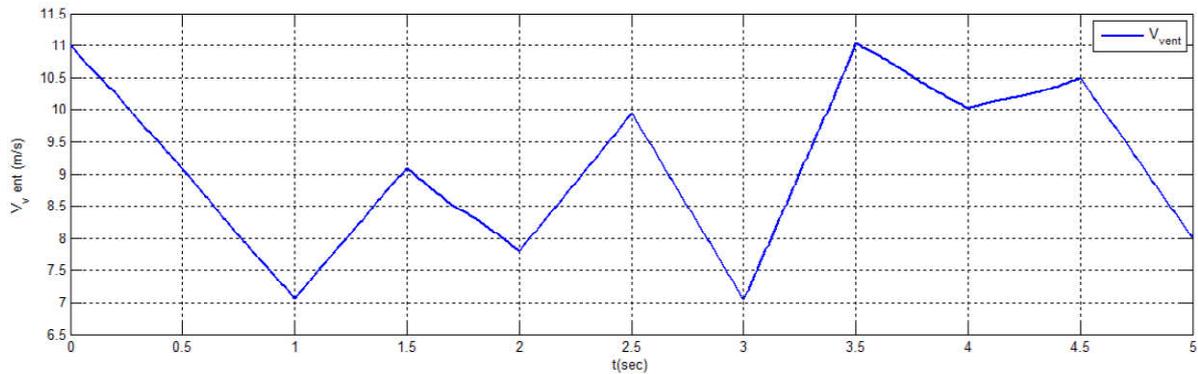


Figure II.1 : Profil du vent

## II.2 Modélisation de la turbine :

Les éoliennes à vitesse fixe sont ainsi nommées parce qu'elles fonctionnent avec moins de 2% de variation de la vitesse du rotor de la turbine. Elles emploient les machines asynchrone à cage d'écureuil directement connectée au réseau électrique.

Les lames de rotor sont fixées au moyeu à un emplacement fixe, et conçue de telles sortes que l'écoulement d'air sur les pales varie en fonction du vent et peuvent résister aux écoulements aérodynamiques turbulents à des vitesses de vent élevées. Cela limite la puissance cinétique extraite du vent à cette vitesse (pour protéger la machine à induction et le réseau entre la surchauffe et la survitesse).

Les éoliennes sont conçues pour fonctionner dans une large plage de la vitesse du rotor. Cette vitesse peut varier avec la vitesse du vent, ou d'autres variables du système, en fonction de la conception utilisée. Généralement dans les turbines à vitesse variable, les pales ne sont pas fixées de façon rigide au moyeu, et peuvent être tourné de quelques degrés.

Le contrôle de vitesse et de puissance permet à ces turbines d'extraire plus d'énergie à partir d'un régime de vent réel en comparaison avec le potentiel obtenu pour des turbines à vitesse fixe

Pour les turbines MADA, les convertisseurs de puissance sont nécessaires pour interfacer l'éolienne et le réseau. Un avantage important de systèmes à base de convertisseur est de permettre le contrôle de la puissance active et réactive indépendant.

Les éoliennes à vitesse fixe sont à faible coût, robuste, fiable, facile à entretenir, et éprouvée dans le domaine [12]. Un grand nombre d'éoliennes à vitesse fixe ont été installées sur les dernières années, et plus continuer à être installées.

Alors que les éoliennes à vitesse variable forment la majeure partie des nouvelles capacités installées, une niche pour les éoliennes à vitesse fixe existe toujours. Par conséquent, on peut s'attendre à ce que les éoliennes à vitesse fixe continuent à jouer un rôle dans les systèmes d'alimentation du futur. Bien qu'il existe de nombreux modèles dynamiques d'éoliennes disponibles dans la littérature, l'accent est mis principalement sur la modélisation à vitesse variable des éoliennes [12]. Ces modèles simplifient souvent le train et l'aérodynamique d'entraînement mécanique, puisque le but est d'évaluer les mécanismes d'alimentation et de commande de la vitesse du rotor.

Dans le modèle développé ici, une approche modulaire est utilisée pour représenter chacune des fonctions de la turbine. Un bloc représente l'aérodynamique, l'autre le système de transmission mécanique, et un troisième représente le générateur électrique. Un bloc de contrôle peut également être inclus. Les blocs sont intégrés pour former le modèle d'éolienne complète, qui est mis en œuvre avec l'utilisation de Matlab / Simulink. Ce modèle est une plate-forme sur laquelle des modèles d'éoliennes plus avancés à vitesse variable peuvent être développés. Les turbines à vitesse variable utilisent des rotors bobinés machines asynchrones comme des générateurs, et le contrôle de la puissance de sortie est obtenu par le contrôle de la résistance du rotor, ou grâce à l'utilisation de convertisseurs électroniques de puissance dans le circuit de rotor dans des turbines DFIG. Ce chapitre explique le principe derrière le contrôle de la résistance dans le détail

et discute différentes stratégies de lutte pour la réalisation de l'extraction optimale de la puissance.

La technologie MADA est également discuté et un modèle est développé et validé en utilisant des données sur le terrain de l'usine d'énergie éolienne disponibles [12].

**Hypothèses simplificatrices :**

Les éoliennes sont conçues pour capturer l'énergie cinétique présente dans l'éolien et convertir en énergie électrique. Une analogie peut être faite entre les éoliennes et des unités de production classiques pour l'exploitation de l'énergie cinétique de la vapeur. à partir de un point de vue de la modélisation, une éolienne à vitesse fixe se compose de ce qui suit composants :

- rotor de la turbine et assemblage des pales
- Arbre et l'unité de boîte de vitesses (rotor et variateur de vitesse)
- Générateur à induction
- Système de contrôle

L'interaction entre chacun des éléments détermine la quantité d'énergie cinétique est extrait de l'éolienne. Modélisation des sous-systèmes électriques est assez simple, comme un logiciel de modélisation de système d'alimentation comprend généralement un modèle de machine à induction intégrée. Cependant, la modélisation de l'aérodynamique et mécanique du train d'entraînement est plus difficile.

Ces composants sont modélisés fondées sur le différentiel et équations algébriques qui décrivent leur fonctionnement [12].

### II.2.1 Modèle aérodynamique:

Le bloc aérodynamique se compose de trois sous-systèmes: calcul de la vitesse relative, coefficient de puissance du rotor  $C_p$  de calcul, et calcul de couple aérodynamique. Vitesse du vent  $V_{vent}$  et l'angle d'inclinaison  $\beta$  sont des entrées définies par l'utilisateur. Comme le modèle est destiné à étudier la réponse dynamique des éoliennes à des événements du réseau, l'hypothèse est habituellement faite que la vitesse du vent reste constante au cours de l'évacuation de réseau. Cependant, les modèles permettent le signal d'entrée de vitesse du vent pour être réglé à n'importe quelle valeur au début de la simulation d'exécution et également pour être modifié pendant l'exécution. Il est également possible d'utiliser une série temporelle de données de vitesse du vent réel.

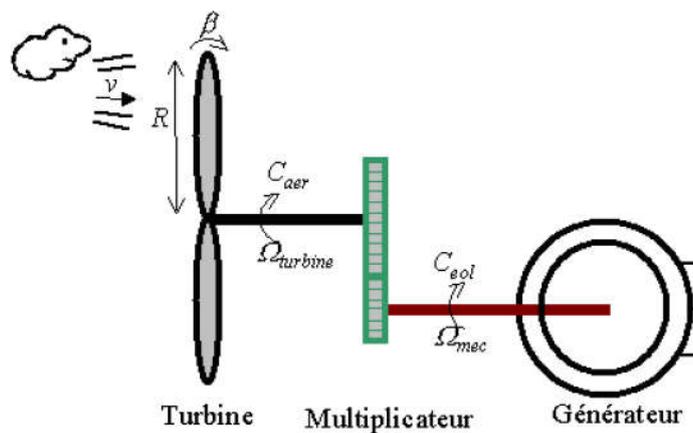


Figure II.2 : Schéma de la turbine éolienne

#### Considérations préliminaires :

L'énergie cinétique  $E_{cv}$  dans un objet de masse  $m$  en mouvement avec une vitesse  $v$  est donnée par :

$$E_{cv} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_v^2 \quad (II.4)$$

Avec :

$$m = \rho \cdot v \Rightarrow E_{cv} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v \cdot V_v^2 \quad (II.5)$$

Alors:

$$E_{cv} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot l \cdot V_v^2 \quad (II.6)$$

Une éolienne est un dispositif de conversion d'énergie électromécanique, que les captures l'énergie cinétique disponible à partir du vent. Cette énergie cinétique est transformée en mécanique énergie du rotor et éventuellement en énergie électrique provenant du générateur. Puissance disponible dans l'air en mouvement est donnée comme suit

$$P_v = \frac{d}{dt} \cdot E_{cv} \quad (II.7)$$

Donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{dl}{dt} \cdot V_v^2 \\ \frac{dl}{dt} = V_v \end{array} \right. \Rightarrow P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot V_v^3}{2} \quad (II.8)$$

Pour déterminer la puissance extraite par un rotor de turbine à vent, Betz modèle (1926) est largement utilisé. Modèle Betz est non seulement utilisé pour trouver la puissance d'un rotor de turbine idéal

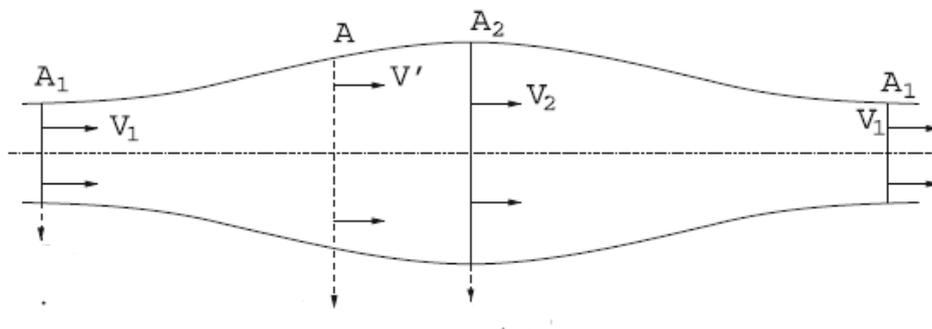


Figure II.3 : les conditions de la vitesse du vent avant et après le convertisseur

Mais aussi de trouver la poussée du vent sur le rotor idéal et l'effet du fonctionnement du rotor sur le champ de vent local. Ce modèle simple est basé sur la théorie de la quantité de mouvement. L'analyse suppose un volume de contrôle dont frontières est la surface d'un tube de courant et de ses deux sections transversales. La turbine de l'analyse est représentée par un disque d'actionnement uniforme ou convertisseur qui crée une discontinuité de pression dans le tube de courant d'air qui le traverse. L'analyse de Betz suppose en outre que [12] :

- L'air est homogène, incompressible et a atteint un écoulement de fluide à l'état stable.
- Il n'y a pas la résistance de frottement.
- Nombre de pales sur le rotor sont infinies.
- Poussée uniforme se produit sur la surface de disque ou rotor.

La figure II.3 montre les conditions d'écoulement du vent pour un convertisseur d'énergie.

La puissance extrait du vent au moyen d'un tel convertisseur est donnée par la différence de déplacement puissance de particules de l'air avant et après le convertisseur. La puissance extraite par le Convertisseur d'énergie est donnée par l'équation :

$$P_{\text{extraire}} = P_{v1} - P_{v2} = \frac{1}{2} \rho A (A_1 v_1^3 - A_2 v_2^3) \quad (\text{II. 9})$$

Figure II.3 décrit la variation de la villosité du vent, avant et après le convertisseur. Pour obtenir un rendement idéal dans la conversion d'énergie, il est nécessaire que la vitesse du vent après le convertisseur devienne nulle. Un convertisseur d'énergie plus pratique, engendrera une augmentation de la pression de l'air juste avant le convertisseur, ce qui aboutirait à la fois, la diminution de la vitesse de l'air, exerçant ainsi une force donnée par l'équation :

$$F = m'(v_1 - v_2) \quad (\text{II. 10})$$

Ainsi, la puissance extraite du vent est donné par l'équation ci-dessous :

$$P_{\text{extraire}} = Fv' = m'(v_1 - v_2)v' \quad (\text{II. 11})$$

En comparant les deux équations obtenues pour P extraire [Eq. (9) - (11)], et en supposant que le débit massique à travers le convertisseur est constante, la vitesse de l'air à travers le convertisseur est la vitesse moyenne du vent  $v' = 1/2(v_1 + v_2)$

Puis le puissance extraite du convertisseur peut être calculée comme suit :

$$P_{\text{extraire}} = \frac{1}{4} \rho A (v_1^2 - v_2^2) (v_1 + v_2) \quad (\text{II. 12})$$

Le coefficient de puissance du rotor d'expression peut alors être défini comme suit :

$$C_p = \frac{P_t}{P_v} \quad (\text{II. 13})$$

C'est le rapport entre la puissance extraite du rotor à la puissance disponible à partir de vent, aussi connu comme le coefficient de performance de rotor et parfois référencé comme facteur de Betz. Comme décrit au paravant, Betz a créé une modèle basé sur la théorie de quantité de mouvement, avec quelques hypothèses pour l'analyse. Le coefficient de puissance peut atteindre une valeur maximale de 0.593, alors qu'il s'agit de la valeur maximale théoriquement possible de  $C_p$ . En raison des pertes aérodynamiques, la valeur réelle du coefficient de puissance jamais atteint 0.593. Dans la pratique, un effet est pris en compte pour la diminution de la valeur maximale possible :

- nombre fini des pales du rotor et les pertes éventuelles d'extrémité associés.

Dans la section suivante, la relation entre  $C_p$  et la vitesse relative  $\lambda$  à une valeur particulière de l'angle d'inclinaison des pales  $\beta$  sera présenté. Cette relation peut être utilisée pour d'établir des courbes  $C_p - \lambda$ . Ceux-ci sont utilisés pour déterminer la puissance du rotor pour toute combinaison de la vitesse du vent et la vitesse du rotor.

Equation dynamique de l'arbre:

Le modèle mécanique est illustré par :

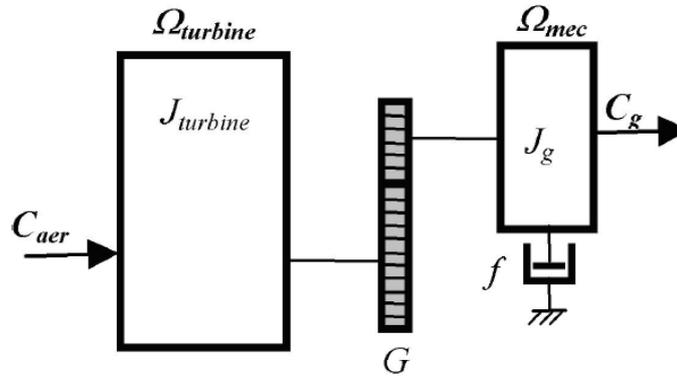


Figure II.4 : Modèle mécanique simplifié Du multiplicateur

Sachant que :

$$\frac{1}{2} = J_t \Omega_t^2 = \frac{1}{2} = J_m \Omega_m^2 \quad (II.14)$$

$$\Omega_m = J \Omega_t \quad (II.15)$$

En remplace l'équation (II.14) dans l'équation dynamique (II.15) , le moment d'inertie après le multiplicateur  $G$  est donné par :

$$J_m = \frac{J_t}{G^2} \quad (II.16)$$

Le modèle mécanique proposé, considère l'inertie totale  $J$ , constituée de l'inertie de la turbine reporté sur le rotor de la génératrice (de la turbine après le multiplicateur), et l'inertie de la turbine après le multiplicateur  $J_m$  [7]

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_m \quad (II.17)$$

A partir des équations (II.11) (II.13), le couple mécanique  $C_t$  avant le multiplicateur de l'aérogénérateur peut donc s'exprimer par :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2\lambda} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 V_v^2 \quad (II.18)$$

Il est à noter que l'inertie du rotor d'une machine connectée après le multiplicateur est très faible par rapport à l'inertie de la turbine.

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique  $C_m$  qui sera appliquée au rotor :

$$J \cdot \frac{d\Omega_m}{dt} = C_m \tag{II. 19}$$

Avec :

$$C_m - C_{em} = J \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \Omega_m \tag{II. 20}$$

En remplace l'équation(II – 18)dans l'équation (II – 21) on obtient alors:

$$C_m - C_{em} = \left( \frac{J_t}{G^2} + J_m \right) \cdot \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \Omega_m \tag{II. 21}$$

En appliquant la transformation de Laplace, l'équation(II. 21) s'écrira:

$$C_m - C_{em} = (J \cdot s + f_v) \tag{II. 2}$$

A partir de ce qui précède, on aboutit au schéma bloc de notre aérogénérateur :

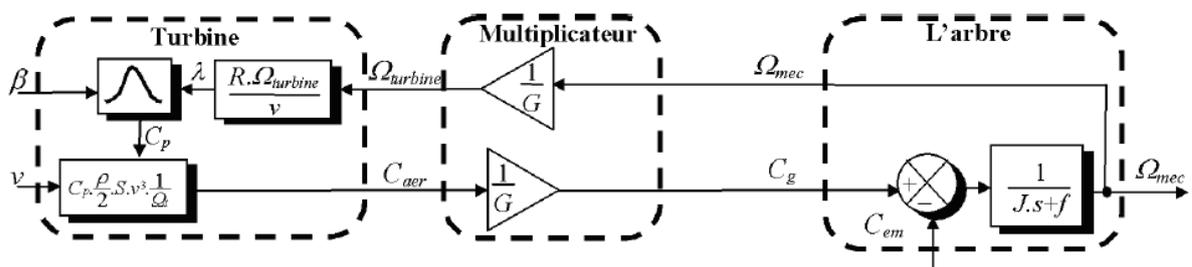


Figure II. 5 : Modèle de l'aérogénérateur

### II.2.2 L'angle d'inclinaison (Blade pitch angle) :

L'angle d'inclinaison ou de calage permet de faire varier directement le coefficient de puissance d'une turbine. Il peut être utilisé efficacement pour le contrôle de la puissance de sortie du rotor. La réduction mécanique de la puissance du rotor peut être réalisée en réduisant ou minimisant l'angle d'attaque au-dessus de sa valeur critique. En limitant le coefficient de puissance, la puissance extraite à partir du vent est limitée. Ce type de commande de puissance est également connu en tant que commande de l'angle de calage (pitch control). Cette commande peut être utilisée pour atteindre différents objectifs :

- Optimisation de la puissance de l'éolienne, en maximisant la puissance mécanique de sortie pour une vitesse de vent donnée, ce qui est généralement appliqué pour des vitesses faibles et modérées du vent, tout en étant inférieur à la vitesse nominale.
- Prévenir l'excès de puissance mécanique de sortie pour les vents forts au-dessus des vitesses du vent limit. Cela permet de maintenir un contrôle de la puissance mécanique et la maintient au-dessous de la valeur nominale dans le cas des vents forts.
- Pour prévenir le mouvement (rotation) des pales dans le cas de turbines déconnectées [12].

Il ya deux façons communes dans lesquelles le contrôle de l'angle de calage peut être utilisé pour la régulation de la puissance de sortie d'éolienne.

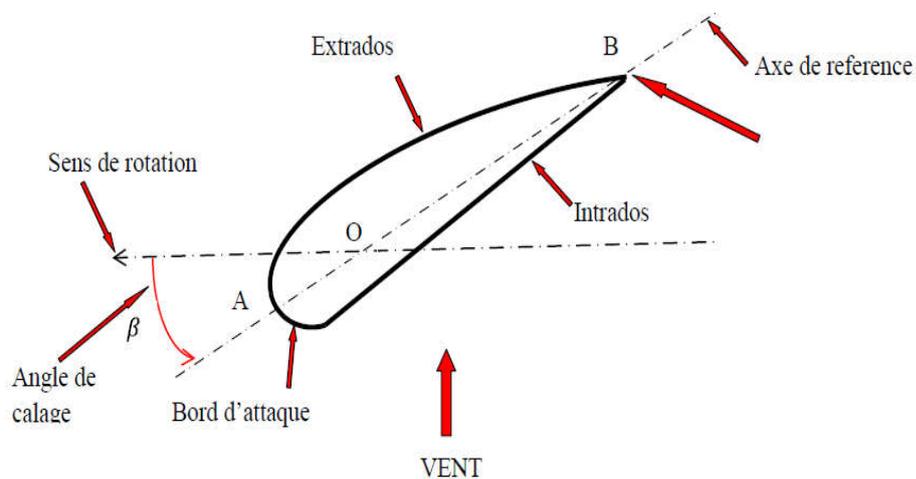
- **commande actif de l'angle de calage:** Pour des vitesses variable d'une éolienne, le fonctionnement d'une turbine ainsi que sa puissance de sortie peuvent être affectés soit par des changements de vitesse ou de variation de l'angle de calage des pales. Dessous de la puissance nominale, ces machines fonctionnent à la vitesse variable d'optimiser la vitesse relative au niveau de l'angle de calage fixe. Après la puissance nominale de sortie est obtenu un contrôle de couple de générateur est utilisé pour maintenir la puissance de sortie, tout en hauteur contrôle est utilisé pour maintenir la vitesse du rotor. A des vitesses de vent élevées, la puissance de sortie du générateur peut être maintenue constante, avec

une augmentation de la vitesse du rotor. Cette augmentation de l'énergie disponible dans le vent est stockée sous forme d'énergie cinétique dans le rotor. Il en résulte à la fois la réduction du couple aérodynamique et d'accélération du rotor.

Si la vitesse du vent continue à rester élevée, l'efficacité aérodynamique du rotor peut être réduite en modifiant l'angle de calage, ce qui réduit la vitesse du rotor.

- **commande passif de l'angle de calage:** En cas de contrôle passif la vitesse du vent est utilisée pour fournir la puissance d'actionnement, ce qui permet d'ajuster l'angle des pas des pales. Dans ces modèles d'éoliennes, les effets des changements dans la vitesse du rotor ou la vitesse du vent sont liés aux changements de l'angle d'inclinaison des pales.

L'action de l'air en mouvement va se traduire par des forces appliquées en chaque point de la surface. Les pales ont un profil aérodynamique présenté sur le schéma de la Figure(II.10) [13]:



**Figure II.6 : Eléments caractéristiques d'une pale**

On remarque plus particulièrement les éléments suivants :

- Corde : longueur  $l$  du profil du bord d'attaque au bord de fuite.
- Angle de calage  $\beta$  (inclinaison de l'axe de référence par rapport au plan de rotation).
- Extrados : dessus des pales

- Intrados : dessous des pales

Les profils sont généralement de type plan-convexe (l'intrados est plan alors que l'extrados est convexe) ou alors biconvexe (l'intrados et l'extrados sont convexes). Ils sont normalisés et les paramètres sont bien définis [13].

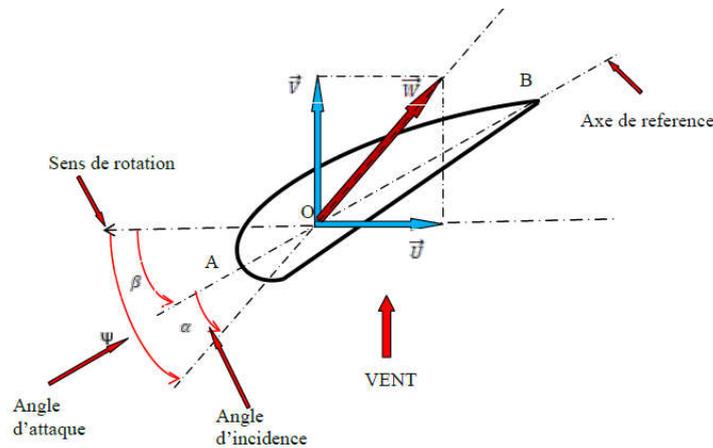


Figure II.7: Directions du vent sur un tronçon de pale

### II.2.2.1 Effort sur une pale d'éolienne :

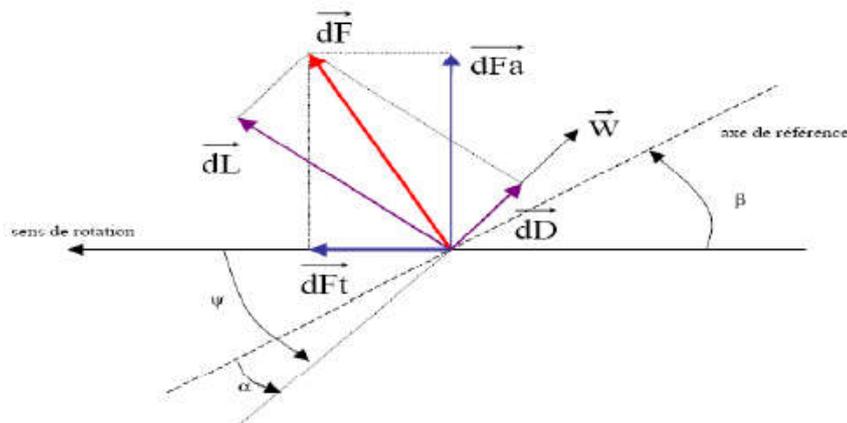


Figure II.8 : Forces appliquées sur un tronçon de pale [14]

On peut décomposer la force résultante  $\vec{dF}$  de la manière suivante :

- ❖ La portance  $\vec{dL}$ , normale à la direction du vent apparent.
- ❖ La force de traînée  $\vec{dD}$ , parallèle à la direction du vent.

On peut aussi la décomposer d'une autre manière :

- ❖ La poussée axiale  $\vec{dF}_a$ , perpendiculaire au plan de rotation.
- ❖ La poussée tangentielle  $\vec{dF}_t$ , dans la direction de rotation.

### II.2.3 Relation du coefficient de puissance avec l'angle de calage et la vitesse relative:

Une relation empirique entre (coefficient de puissance du rotor), la vitesse relative  $\lambda$  et angle d'inclinaison  $\beta$  est utilisé pour l'élaboration d'une table de consultation qui fournit une valeur de  $C_p$  pour une valeur donnée de la vitesse du vent et la vitesse relative. Angle d'inclinaison des pales peut être défini comme l'angle entre le plan de rotation et de pale ligne de corde. Vitesse de pointe rapport est défini comme le rapport de la vitesse linéaire de la lame à pointe à la vitesse du vent [12]

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{V_v} \tag{II.24}$$

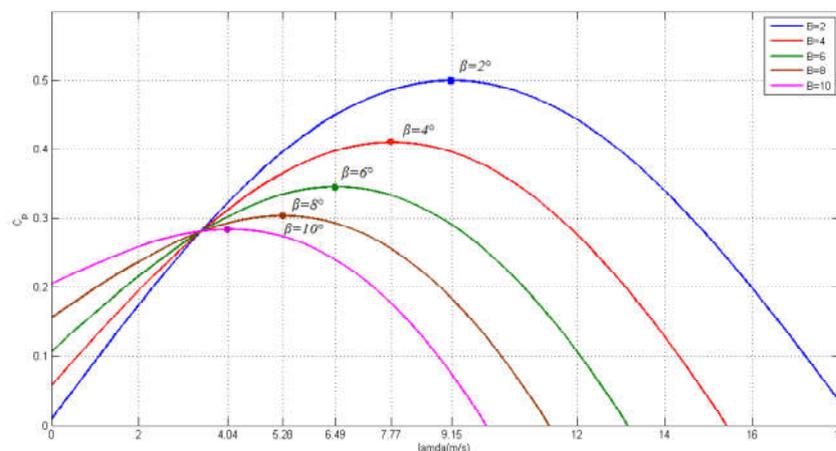


Figure II.9 : caractéristiques  $C_p=f(\lambda)$  pour cinq valeurs de  $\beta$

Il existe plusieurs formulation pour le calcul de coefficient de puissance  $C_p$ . Dans notre cas, le choix s'est porté sur l'expression ci-dessous [11]:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 - 0.0167 \cdot (\beta - 2) \cdot \sin\left(\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{14.8 - 0.3(\beta - 2)}\right) - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \tag{II.25}$$

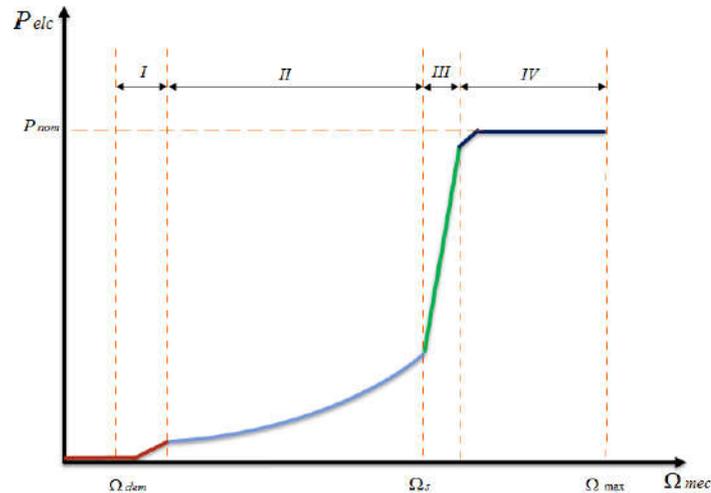
Il est à noter que cette équation sera utilisée lors de nos différentes simulations (II.13)

### II.2.4 Stratégies de commande:

Avant d'entamer l'objet de notre étude qui est la simulation des stratégies de commande adoptée pour chacune des zones de fonctionnement de la turbine, selon la force du vent, nous allons exposer la théorie qui nous a permis de développer les schémas

de simulation pour ces différentes zones de fonctionnement. En effet; selon la vitesse du vent, la caractéristique de fonctionnement de la turbine d'une éolienne peut être divisée en quatre zones différentes, on a 2 stratégie de commande :

**a. 1<sup>er</sup> methode :**



**Figure II.10 : Les quatre zones de fonctionnement de la turbine**

Les différentes zones 1, 2, 3 et 4 sont respectivement : zone de démarrage, zone de démarrage, zone à charge partielle 1, zone à charge partielle 2 et enfin zone à pleine charge.

**Zone 1 :** Pour la zone 1 dite zone de démarrage, elle ne sera pas traitée par la suite car elle n'a pas d'importance capitale puisque la turbine ne produit aucune puissance appréciable.

**Zone 2 :** Dans la zone 2 dite à charge partielle 1, l'angle de calage  $\beta$  est maintenu à 0 et la vitesse de rotation est fixée à une valeur permettant un ratio de vitesse correspondant au coefficient de puissance maximal  $C_{pmax}$ . Dans notre cas, ce coefficient est 0.48 obtenu grâce au contrôle de type MPPT.

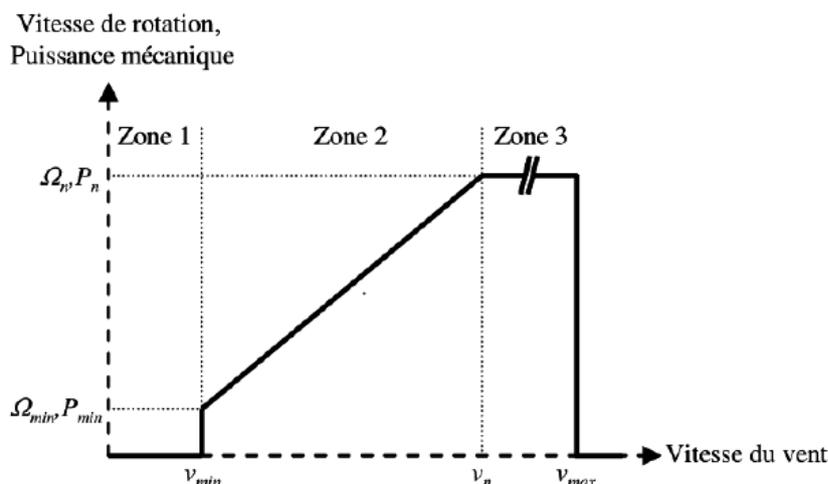
Afin de modéliser cette zone, on doit imposer un couple de référence de manière à permettre à la turbine de tourner à une vitesse optimale afin d'extraire le maximum de puissance.

**Zone 3 :** Dans la zone 3 dite à charge partielle 2, la vitesse de la turbine ne doit plus être sous le contrôle MPPT car sa vitesse de rotation peut atteindre environ 90 % de sa valeur

nominale, mais elle doit garder sa vitesse constante jusqu'à ce qu'elle atteigne la puissance nominale.

**Zone 4 :** Dans cette zone dite pleine charge, nous recherchons à maintenir la production de la puissance à sa valeur nominale afin de ne pas détériorer l'éolienne en appliquant aux pâles un angle de calage adéquat (augmentation de l'angle de calage des pales  $\beta$ ) afin de dégrader le rendement de l'éolienne.

b. 2<sup>er</sup> méthode :



**Figure II.11 : Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable**

**Zone I :** La vitesse du vent est faible, insuffisante pour permettre de démarrer l'éolienne, la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont alors égales à 0.

**Zone II :** Le vent atteint une vitesse minimale  $V_{min}$  pour permettre le démarrage. Une fois ce démarrage effectué, l'éolienne va fonctionner de manière à extraire le maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale  $V_n$  correspondant aux valeurs nominales de la puissance mécanique  $P_n$  et de la vitesse de rotation  $\Omega_n$ .

**Zone III :** Le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse nominale, la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leurs valeurs nominales afin de ne pas détériorer l'éolienne. Ces limitations peuvent s'effectuer, par

exemple, en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader le rendement de l'éolienne (augmentation de l'angle de calage des pales  $\beta$ ). Dès que le vent a atteint sa valeur maximale  $V_{max}$ , une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée afin d'éviter toute destruction de celle-ci.

A partir des deux méthodes, on voit bien que les zones II sont identiques et dépendent exactement à notre cas d'étude (pour des angles  $\beta$  constant).

Pour cette zone il existe différentes stratégies de commande [5] pour contrôler le couple électromagnétique appliqué au rotor de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), de manière à régler la vitesse de rotation pour maximiser la puissance électrique produite. Cette stratégie est connue sous la terminologie MPPT (maximum power point tracking).

### **II.3. Techniques d'extraction du maximum de la puissance:**

#### **II.3.1 Bilan des puissances:**

La puissance capturée par la turbine éolienne. Cette puissance peut être essentiellement maximisée en ajustant le coefficient  $C_p$ . Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice (ou encore du ratio de vitesse), l'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quel que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. En régime permanent, la puissance aérodynamique  $P_{aer}$  diminuée des pertes (Représentées par les frottements visqueux) est convertie directement en puissance électrique (figure II.24).

$$P_{elc} = P_{aer} - P_{pertes} \quad (II.25)$$

La puissance mécanique stockée dans l'inertie totale  $J$  et apparaissant sur l'arbre de la génératrice  $P_{mec}$  est exprimée comme étant le produit entre le couple mécanique  $C_{mec}$  et la vitesse mécanique  $\Omega_{mec}$  :

$$P_{mec} = C_{mec} \cdot \Omega_{mec} \quad (II.26)$$

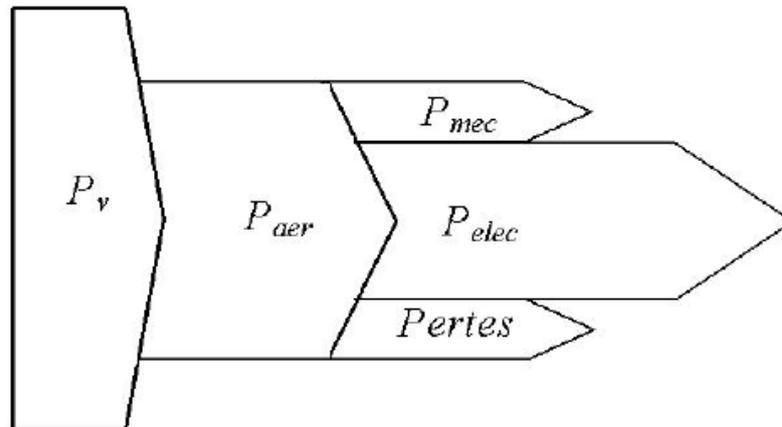


Figure .II.12 : Diagramme de conversion de puissance

Dans cette partie, nous présenterons différentes stratégies pour contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T.) et correspond à la zone 2 de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne. On distingue deux familles de structures de commande qui sont maintenant expliquées [5] (figure II.13) :

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique.
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.
- 



Figure II.13 : Stratégies de commande de la turbine étudiée

**II.3.2. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse:**

**Principe général:**

Le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuante. Le modèle de la turbine montre clairement que les fluctuations du vent constituent la perturbation principale de la chaîne de conversion éolienne et créent donc des variations de puissance.

Pour cette étude, on supposera que la machine électrique et son variateur sont idéaux et donc, que quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad (II.27)$$

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Plusieurs dispositifs de commande peuvent être imaginés. La vitesse est influencée par l'application de trois couples : un couple éolien, un couple électromagnétique et un couple résistant. En regroupant l'action de ces trois couples, la vitesse mécanique n'est plus régie que par l'action de deux couples, le couple issu du multiplicateur  $C_g$  et le couple électromagnétique  $C_{em}$  :

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{2} \cdot C_g - f\Omega_{mec} - C_{mec} \quad (II.28)$$

La référence de la vitesse de la turbine correspond à celle correspondant à la valeur optimale de la vitesse relative optimal  $\lambda_{optimal}$  permettant d'obtenir la valeur maximale du  $C_p$ .

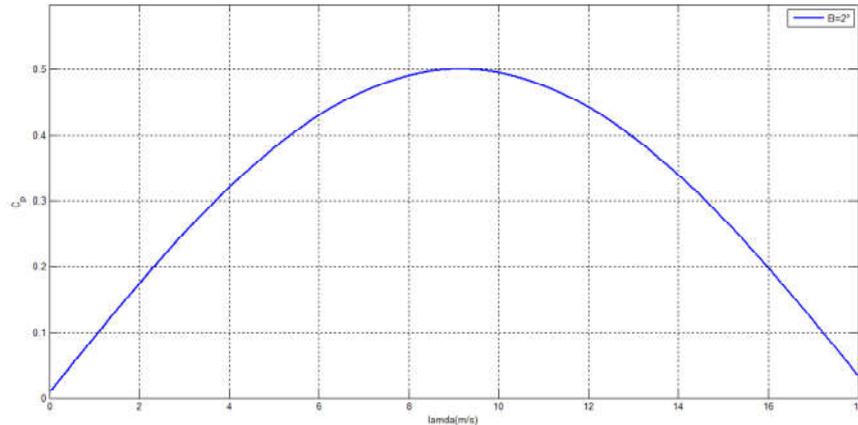


Figure II.14 : Fonctionnement optimal de la turbine

### Conception du correcteur de vitesse

L'action du correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches :

- Il doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.
- Il doit atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice.

La représentation simplifiée sous forme de schéma blocs se déduit facilement de (Figure II.19).

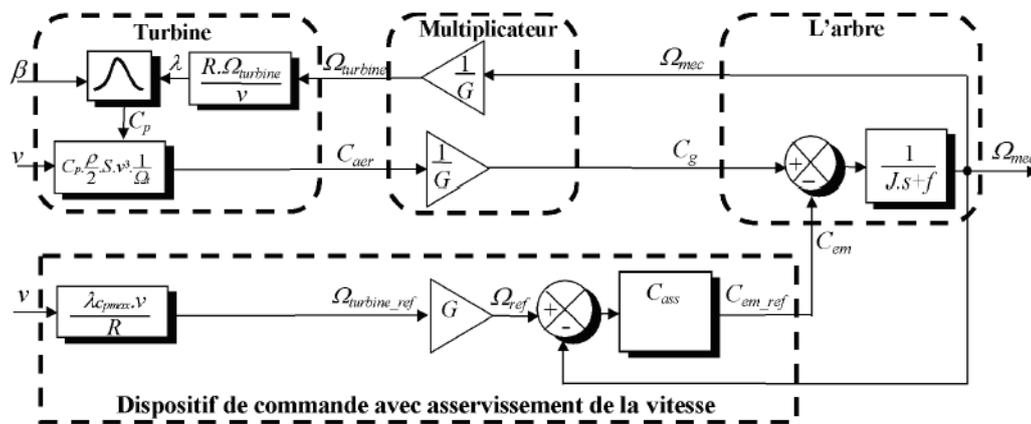


Figure II.15 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse

Différentes technologies de correcteurs peuvent être considérées pour l'asservissement de la vitesse.

Nous détaillerons deux types de régulateur : le correcteur Proportionnel intégral (PI). Ces deux correcteurs ont été utilisés dans le développement des modèles.

### II.3.3 Maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse :

En pratique, une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser. Ceci pour deux raisons : L'anémomètre est située derrière le rotor de la turbine, ce qui erroné la lecture de la vitesse du vent. Ensuite, le diamètre de la surface balayée par les pales étant important (typiquement 70 m pour une éolienne de 1.5 MW), une variation sensible du vent apparait selon la hauteur où se trouve l'anémomètre. L'utilisation d'un seul anémomètre conduit donc à n'utiliser qu'une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales.

Une mesure erronée de la vitesse conduit donc forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique d'extraction précédente. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [15].

Cette seconde structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient l'équation statique décrivant le régime permanent de la turbine :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_{vis} \quad (II. 29)$$

Ceci revient à considérer le couple mécanique  $C_{mec}$  développé comme étant nul. Donc, en négligeant l'effet du couple des frottements visqueux ( $C_{vis} = 0$ ), on obtient :

$$C_{em} = C_g \quad (II. 30)$$

Le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir d'une estimation du couple éolien :

$$C_{em\_ref} = \frac{C_{aer\_estimé}}{G} \quad (II. 31)$$

Le couple éolien peut être déterminé à partir de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique en utilisant l'équations :

$$C_{aer\_estimé} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine\_estimé}} \cdot v_{estimé}^3 \quad (II.32)$$

Le couple éolien peut être déterminé à partir de la connaissance d'une estimation de la vitesse du vent et de la mesure de la vitesse mécanique en utilisant l'équation :

$$\Omega_{turbine\_estimé} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.33)$$

La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation :

$$v_{estimé} = \frac{\Omega_{turbine\_estimé} \cdot R}{\lambda} \quad (II.34)$$

En regroupant ces quatre équations (II.21), (II.19), (II.20), (II.18), on obtient une relation globale de contrôle :

$$C_{em\_ref} = \frac{C_p}{\lambda^3 C_{pmax}} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \quad (II.35)$$

Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur  $C_{pmax}$  qui correspond au maximum du coefficient de puissance  $C_{pmax}$ .

Le couple électromagnétique de référence doit alors être réglé à la valeur suivante :

$$C_{em\_ref} = \frac{C_p}{\lambda_{C_{pmax}}^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (II.36)$$

La représentation sous forme de schéma-blocs est montrée à la figure II.24 :

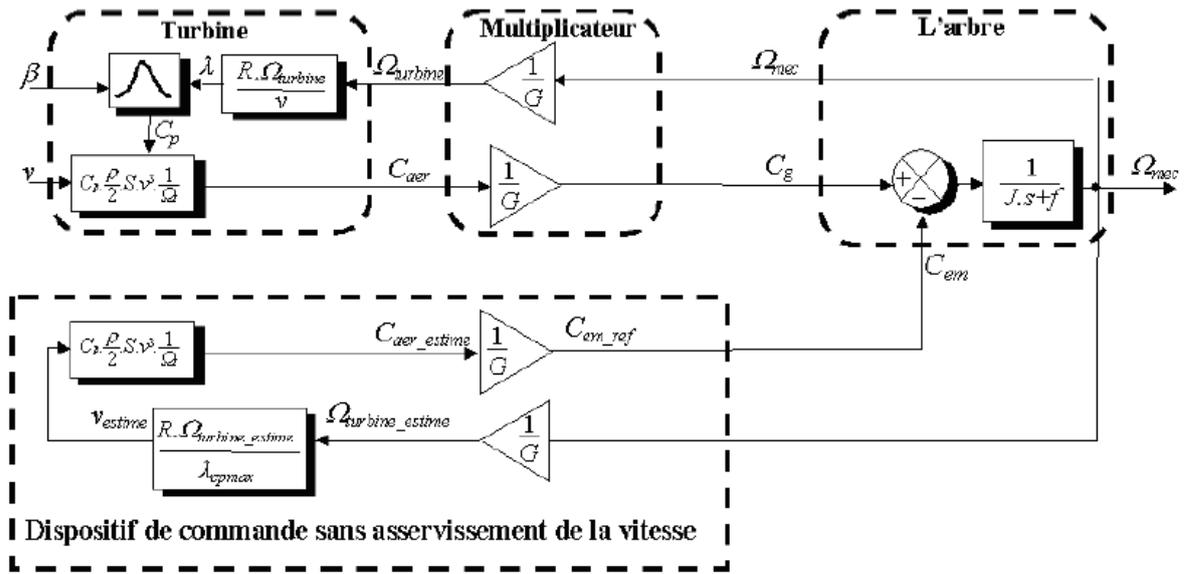


Figure II. 16 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse

### II.3.4 Théorie de la MPPT :

La puissance capturée par la turbine éolienne peut être maximisée en ajustant le coefficient  $C_p$ , Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice. L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance générée en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelle que soit la vitesse du vent.

La majorité des éoliennes ont été réalisés à vitesse constante. Par la suite, le nombre des éoliennes de vitesse variable installé dans les parcs éoliens a augmenté. Nous notons que le l'efficacité énergétique des éoliennes à vitesse variable est largement améliorée par rapport à ceux avec une vitesse fixe. Les performances de ces deux structures sont évaluées par un travail de simulation, à montrer l'avantage de la MPPT par rapport la turbine.

La puissance aérodynamique au niveau du rotor de la turbine est donnée par l'équation suivante :

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (II.37)$$

Contrôle de l'éolienne Pour ne pas dégrader la machine, il est nécessaire de limiter la vitesse. Cette limite est obtenue à l'aide de l'angle de calage  $\beta$  de sorte que quand la vitesse de rotation de la turbine est supérieure à la vitesse  $\Omega_{tn}$ , ce contrôle va permettre de donner l'ordre d'augmenter l'angle de calage pour réduire  $C_t$  (couple de la turbine).

La limitation du couple et donc de la vitesse de la turbine est réalisée en utilisant la commande de l'angle de calage. L'actionneur de vitesse est un actionneur proportionnel. Le couple a été supposée proportionnel à la vitesse de la rotation. La stratégie de contrôle mis en place est la suivante :

$$\begin{cases} \beta_{ref} = \beta_0 = 2 & \text{si } 0 < \Omega_t < \Omega_{tn} \\ \beta_{ref} = \frac{\Delta\beta}{\Delta\Omega}(\Omega_t - \Omega_{tn}) + \beta_0 & \text{si } \Omega_t > \Omega_{tn} \end{cases} \quad (II.38)$$

Avec  $\beta_0$  l'angle initial d'inclinaison (valeur optimale) et  $\Omega_{tn}$  (rad/s) est la vitesse mécanique nominale de la turbine. Après, pour tenir compte du système d'orientation des pales qui peut être de type hydraulique ou électrique, on introduit une fonction de transfert du premier ordre. Le but de ce système est de contrôler la position de l'angle de calage suivant une référence.

$$\beta = \frac{1}{1 + \tau_s} \beta_{ref} \quad (II.39)$$

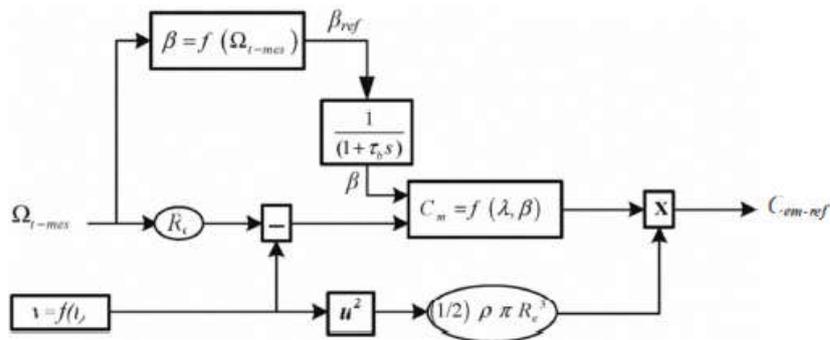


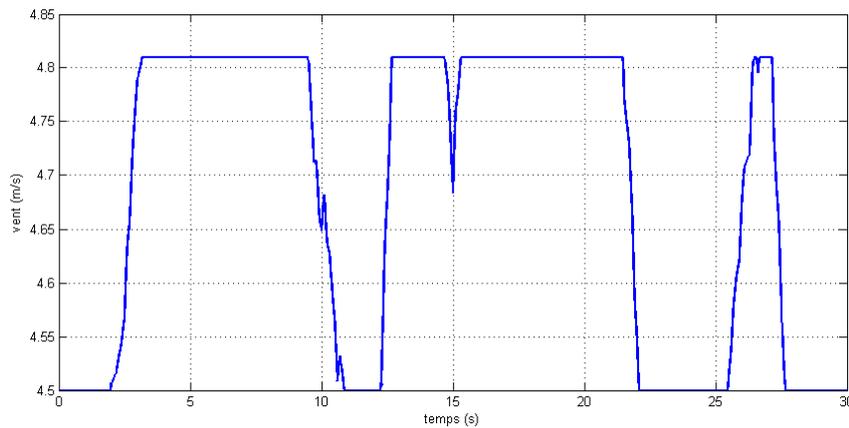
Figure II.17: schéma de la commande de l'angle calage

**II.3.5 Cas d'études de l'impact de la variation de la vitesse du vent sur l'extraction du maximum de la puissance en fonction de  $\beta$  :**

**II.3.5.1 Résultats de simulations :**

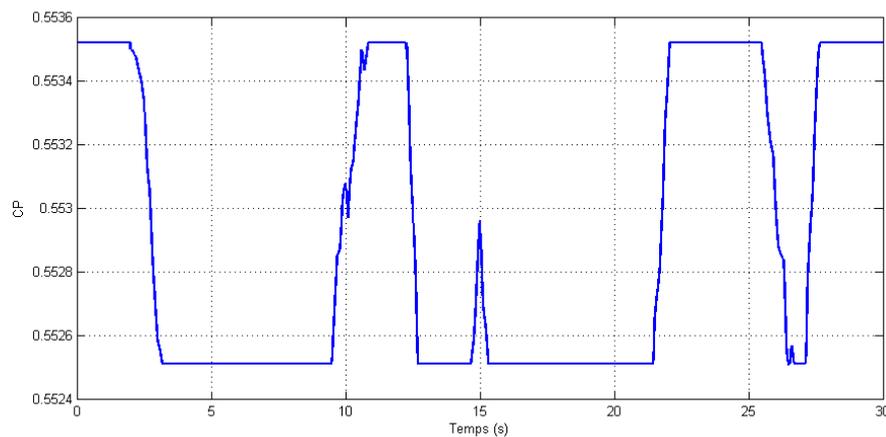
Pour la simulation de la turbine éolienne on considère deux cas :

A. **Simulation** : comportement de notre turbine pour un  $\beta$  fixe et  $V_v$  variable.



**Figure II.18 : profil du vent admissible par la turbine(m/s)**

La figure (II.18) montre la variation de la vitesse du vent en fonction du temps, la vitesse du vent varie entre (4.5 et 4.85 m/s).



**Figure II.19 : coefficient de puissance  $C_p$  de la turbine « avec  $V_v$  variable »**

La figure (II.19) montre l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable, le coefficient  $C_p$  prend toujours une forme d'allure variable, il se met à varier entre de la valeur ( $C_p=0.55$ ) ce qui montre clairement l'influence du profil du vent sur le coefficient  $C_p$  de la turbine, il est en opposition du vent.

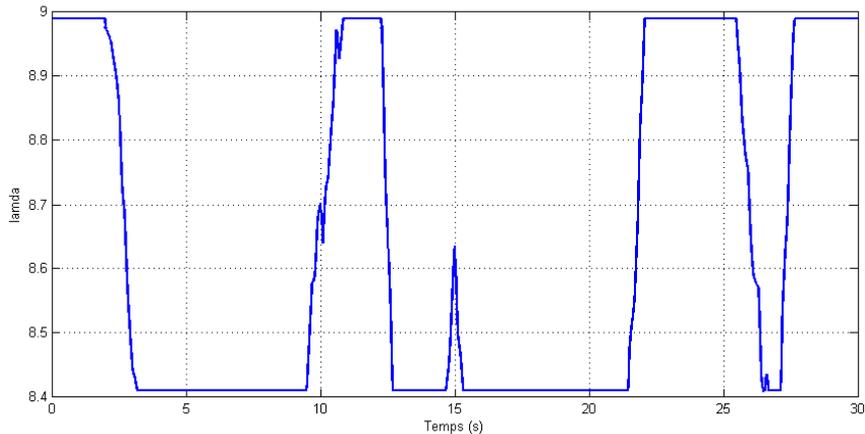


Figure II.20 : coefficient  $\lambda$  de la turbine « avec  $V_v$  variable »

La figure (II.20) montre l'évolution du coefficient  $\lambda$  en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable; l'allure de la courbe est constante, prend une valeur autour de la valeur ( $\lambda=8.7$ ) ce qui montre clairement l'influence du profil du vent sur le coefficient  $\lambda$  de la turbine.

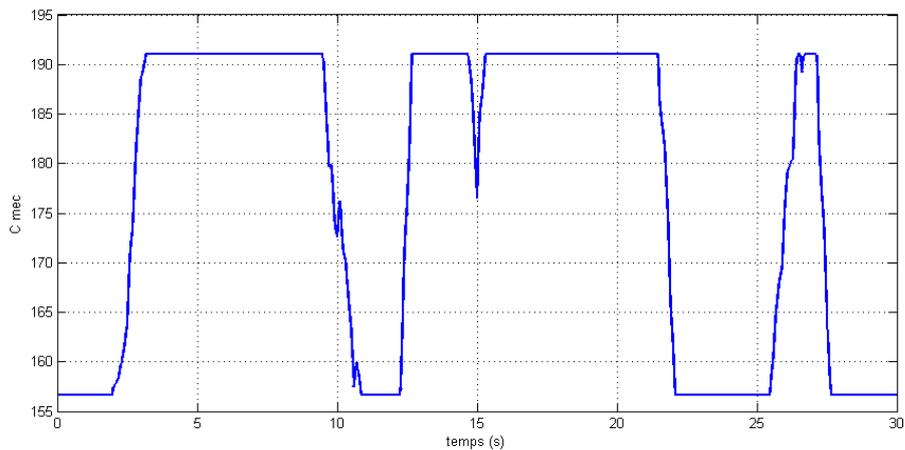
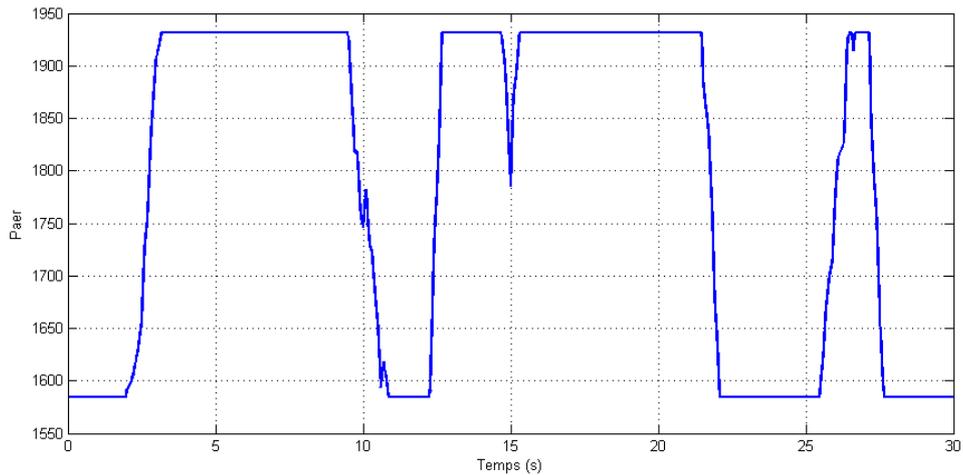


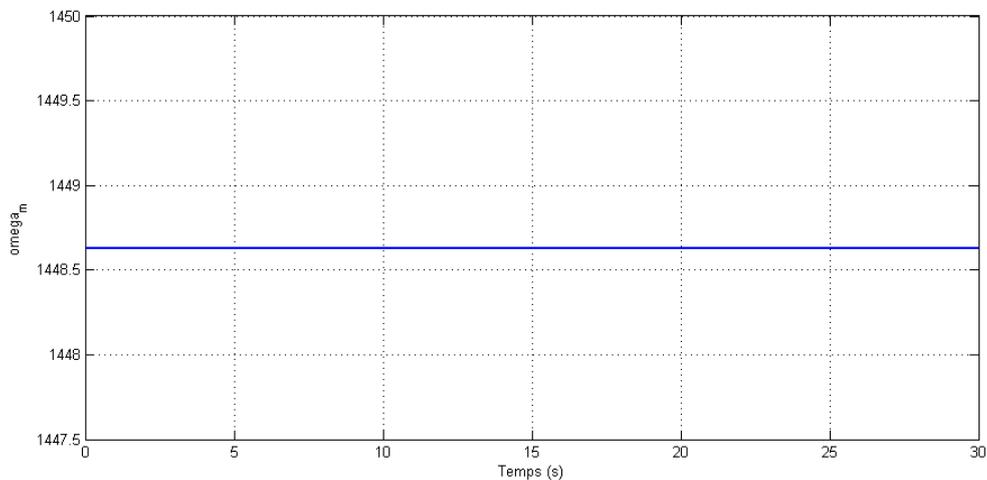
Figure II.21 : couple mécanique de la turbine ( $N.m$ ) « avec  $V_v$  variable »

La figure (II.21) montre l'évolution du couple mécanique de la turbine en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable, l'allure de la courbe prend toujours une valeur variable environ de l'intervalle  $[155,192]$  ce qui montre clairement la perturbation que crée le profil du vent sur le couple mécanique de la turbine ce qui génère des vibrations indésirables au fonctionnement du système.



**Figure II.22 : puissance mécanique de la turbine (*watt*) « avec  $V_v$  variable »**

La figure (II.22) montre l'évolution de la puissance mécanique de la turbine en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable, l'allure de la courbe prend toujours une forme variable environ [1558 1948] ce qui montre clairement la perturbation que crée le profil du vent sur la puissance mécanique de la turbine ce qui altère la qualité de l'énergie électrique issue plus tard de la génératrice.



**Figure II.23 : vitesse de rotation de la turbine (*tr/min*) « avec  $V_v$  variable »**

La figure (II.23) montre l'évolution de la vitesse de rotation de la turbine en fonction du temps pour un vent de vitesse variable ( $V_v=4.5m/s$ ), l'allure de la courbe prend une forme constante environ ( $\Omega=151.7tr/min$ ).

### II.3.5.2 Résultats de la simulation :

Simulation : comportement de notre turbine pour  $\beta$  variable avec  $V_v$  variable.

Les résultats sont présentés sur les figures ci-dessous :

Pour la simulation de la turbine éolienne on considère la simulation de la turbine avec MPPT, c'est à dire comportement de notre turbine  $\beta$  variable et vitesse du vent variable (figure II.24)

Les résultats sont présentés sur les figures ci-dessous :

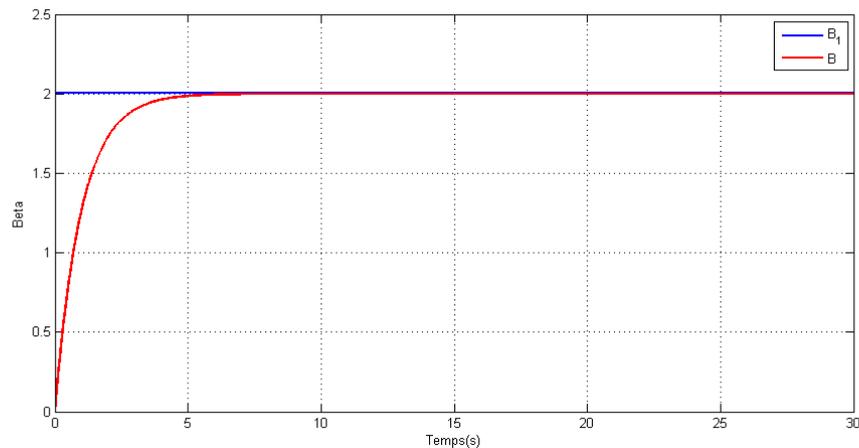
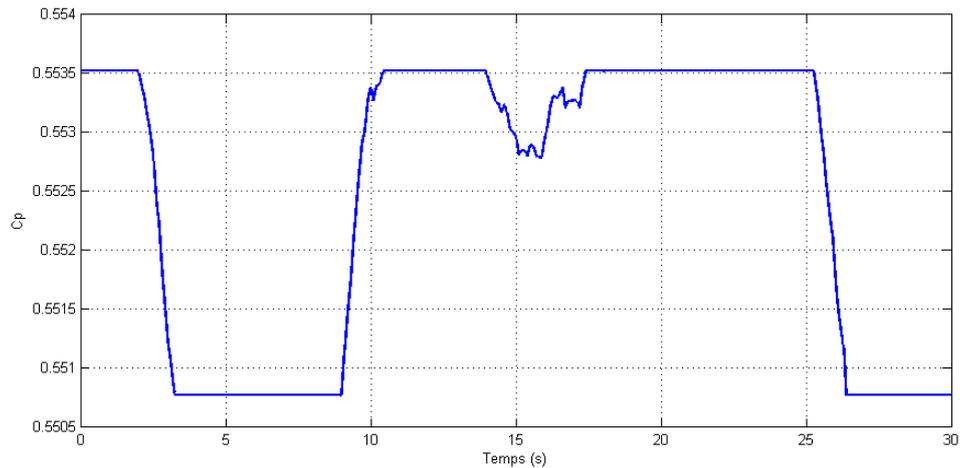


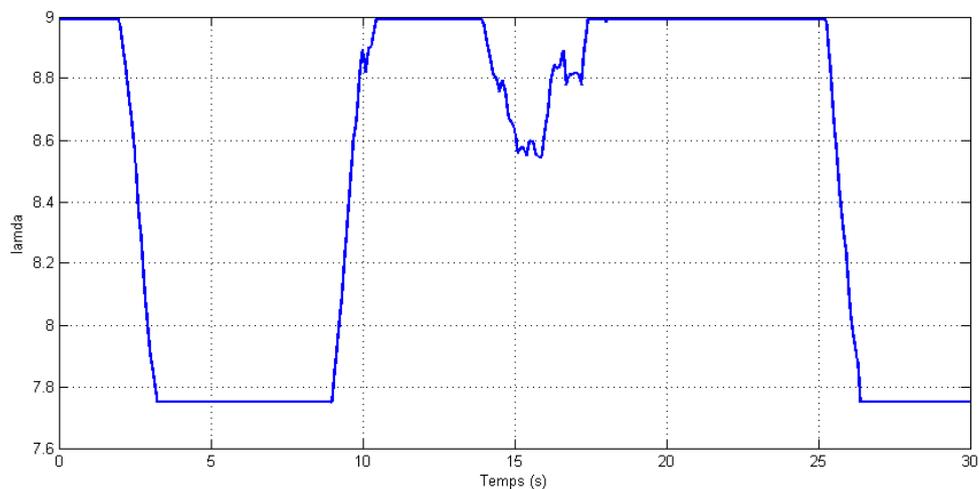
Figure II.24 : l'angle de calage en fonction temps (rad)

La figure (II.24) montre l'évolution de l'angle de calage  $\beta$  en fonction du temps pour un vent de vitesse variable, l'allure de la courbe prend une forme croissance jusqu'à  $\beta_1$ .



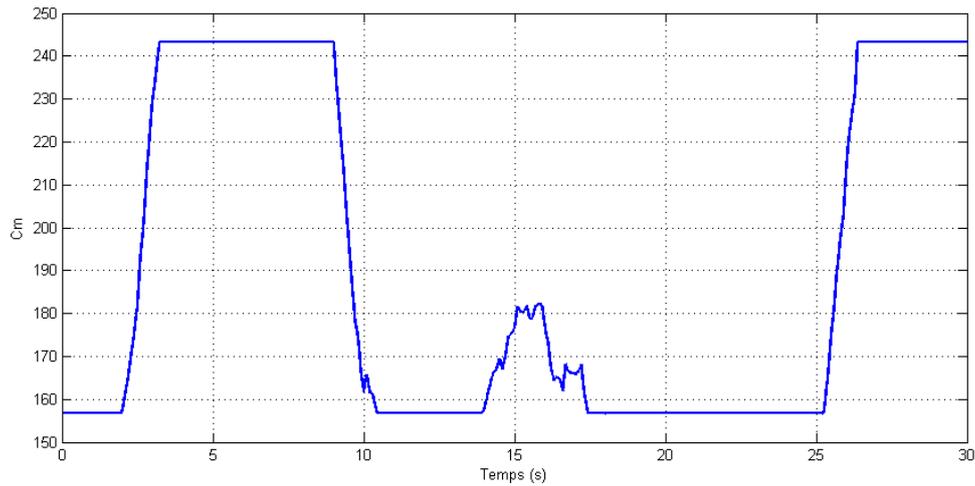
**Figure II.25 : coefficient de puissance  $C_p$  de la turbine**

La figure (II.25) montre l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable et  $\beta$  variable, le coefficient  $C_p$  prend toujours une forme d'allure variable, il se met à varier entre autour de la valeur  $C_p=0.55$  ce qui montre clairement l'influence du profil du vent sur le coefficient de puissance  $C_p$  de la turbine.



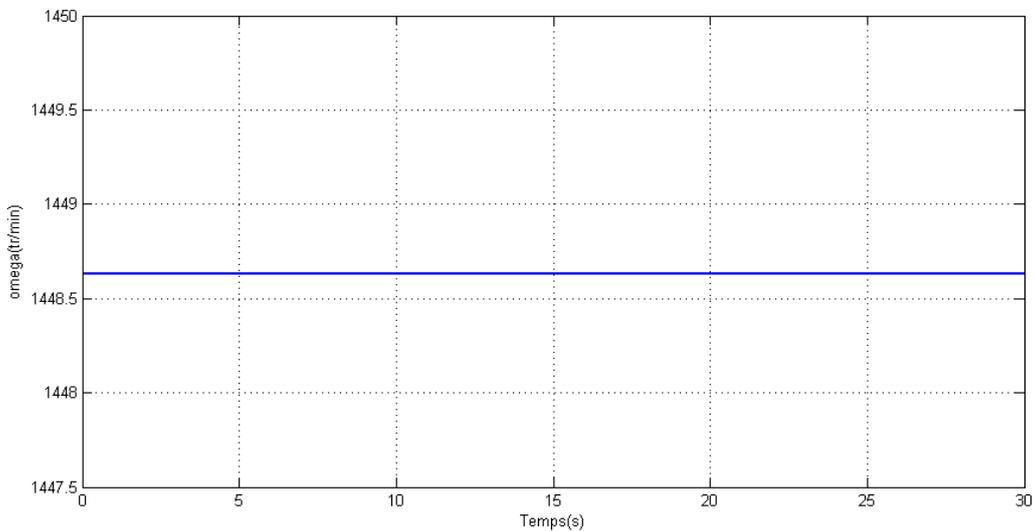
**Figure II.26 : coefficient  $\lambda$  de la turbine**

La figure (II.26) montre l'évolution du coefficient  $\lambda$  en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable et  $\beta$ , l'allure de la courbe est variable, prend une valeur entre [7.75 9] ce qui montre clairement l'influence du profil du vent sur le coefficient  $\lambda$  de la turbine.



**Figure II.27 : couple mécanique de la turbine (N.m)**

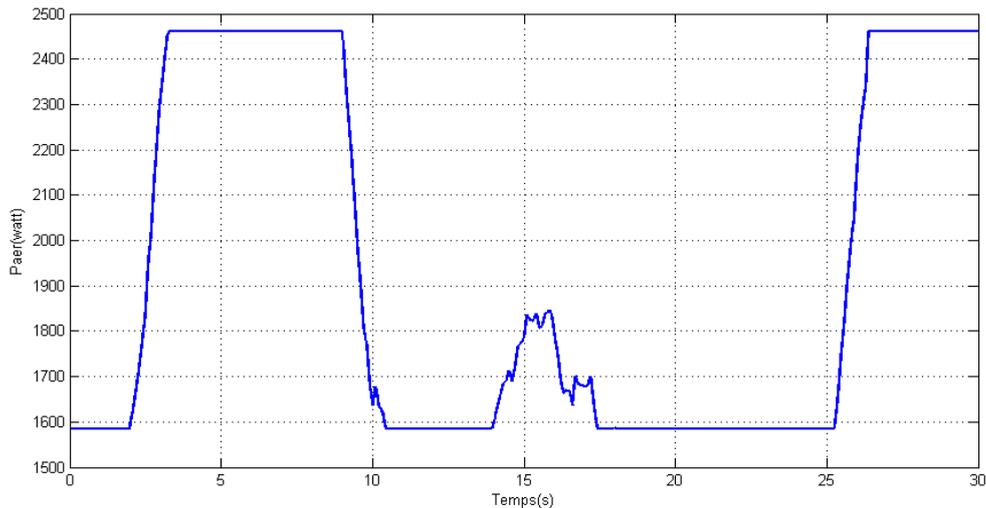
La figure (II.27) montre l'évolution de la couple mécanique de la turbine en fonction du temps, pour une vitesse du vent variable et  $\beta$  variable, l'allure de la courbe prend toujours une forme variable environ [160 242] ce qui montre clairement la perturbation que crée le MPPT sur le couple mécanique de la turbine ce qui altère la qualité de l'énergie électrique issue plus tard de la génératrice.



**Figure II.28 : vitesse de rotation de la turbine (tr/min)**

La figure (II.28) montre l'évolution de la vitesse de rotation de la turbine en fonction du temps pour une vitesse du vent variable et  $\beta$  variable, l'allure de la courbe prend une forme constante environ ( $\Omega=1449tr/min$ ).

Pour la vitesse de rotation de la turbine ( $tr/min$ ) « avec  $V_v$  variable » on remarque la vitesse reste constante.



**Figure II.29 : puissance mécanique de la turbine (watt)**

La figure (II.29) montre l'évolution de la puissance mécanique de la turbine en fonction du temps pour un vent de vitesse variable et  $\beta$  variable, l'allure de la courbe est variable entre l'intervalle [1600 2460].

## II.5 Conclusion:

Nous avons détaillé dans ce chapitre une modélisation de la partie mécanique de l'éolienne prenant en compte les caractéristiques du profil du vent et des pales utilisées et l'angle de calage.

Les stratégies de fonctionnement d'une éolienne (vitesse fixe, vitesse variable) sont également décrites.

Nous avons pu valider le model de notre turbine, ce qui nous permettra de l'utilisé dans le chapitre suivant.

# ***Chapitre III :***

***Etude et simulation d'une génératrice***

***Avec turbine connectée à un réseau électrique  
triphase (A temps continu)***

## **Introduction:**

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Ce type de machine est utilisé comme génératrice dans la plupart des projets de centrale éolienne à travers le monde du fait qu'elle offre de grands avantages de fonctionnement.

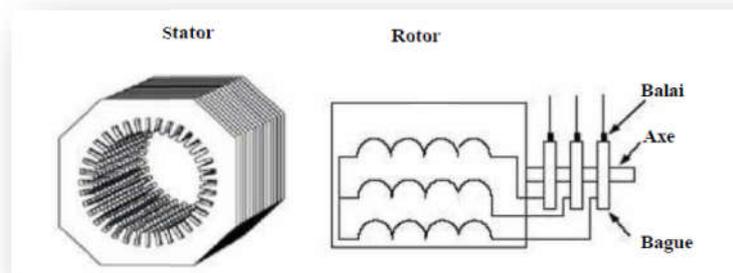
Intégrée dans un système éolien, la génératrice asynchrone à double alimentation permet de fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et d'en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est principalement la raison pour la quelle on trouve ce type de génératrice pour la production de forte puissance [5].

Dans ce chapitre, on se propose de modéliser la chaîne de conversion éolienne à vitesse variable de puissance de 5KW, qui intègre une génératrice asynchrone à double alimentée avec la commande direct et DCP connectée directement aux réseaux par le stator et alimentée au rotor par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance fonctionnant en MLI.

### **III.1. Description de la machine asynchrone à double alimentation:**

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone), il est constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquels viennent s'insérer des enroulements décalés de  $120^\circ$  dans l'espace. Son rotor est constitué de trois bobinages dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [15].

Ce type de machines nécessite une seule source d'alimentation qui peut alimenter les deux côtés de la machine et ceci constitue un avantage principal surtout dans les domaines d'application à vitesse variable, de sorte que le glissement de la machine à double alimentation peut être contrôlé par l'association des convertisseurs de puissance du côté statorique ou rotorique ou bien des deux à la fois. Ceci dépend essentiellement du facteur technico-économique de construction.



**Figure III.1 : Structure du stator et Des contacts rotoriques de la MADA [9]**

### III.2.Principe de fonctionnement de la MADA :

Pour expliquer son principe de fonctionnement, En prenant compte les hypothèses ci-dessous :

- La puissance  $P_{est}$  fournie au stator et traverse l'entrefer, une partie de cette puissance fournie,  $(1-g).P$ , « puissance mécanique », le reste,  $g.P$  sort par les balais (grandeurs alternatives de fréquence  $g.f$ ). Ces grandeurs de fréquence variable sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc  $(1+g).P$ , [5].
- Les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs.
- Une fois connecté au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la réluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique [16][17].
- Le flux magnétique généré par le stator crée des f.e.m dans le bobinage du rotor.

Le rapport entre les f.e.m créée au rotor et au stator:

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \cdot \frac{W_s - W_{mec}}{W_s} \quad (III. 1)$$

En définissant le glissement par:

$$g = \frac{W_s - W_{mec}}{W_s} \quad (III. 2)$$

$$\frac{E_r}{E_s} = \frac{N_r}{N_s} \cdot g \quad (III. 3)$$

Les courants au stator et au rotor sont définis comme dans le cas d'un transformateur parfait :

$$\frac{i_r}{i_s} = \frac{N_s}{N_r} \quad (III. 4)$$

Donc, le rapport entre la puissance  $P_r$  au rotor et la puissance  $P_s$  au stator devient:

$$\frac{P_r}{P_s} = \frac{i_r}{i_s} \cdot \frac{E_r}{E_s} = g \quad (III. 5)$$

Cette équation montre que pour une puissance constante transmise au stator, plus on transmet de la puissance par le rotor et, plus on augmente le glissement. La pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constante, il est donc possible de contrôler la vitesse de la génératrice en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement  $g$  [9].

### III.2.1. Mode de fonctionnement de la MADA :

En générale, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en générateur, cependant la commande des tensions rotoriques permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper synchronisme ou en hypo synchronisme aussi bien en mode moteur ou générateur. [28].

#### Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone :

- La puissance est fournie par le réseau au stator.
- La puissance de glissement est renvoyée au réseau.
- La vitesse de rotation est inférieure au synchronisme.

- La machine asynchrone à cage peut être fonctionné ainsi mais la puissance de glissant est Alor dissipée en pertes Joule dans le rotor [15].

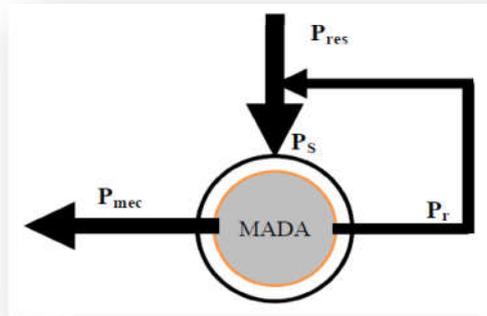


Figure III.2: Le fonctionnement en mode moteur hypo synchrone

#### Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone:

- La puissance fournie par le réseau va à rotor et stator.
- La vitesse de la machine au-dessus de la vitesse de synchronisme,
- La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement [16].

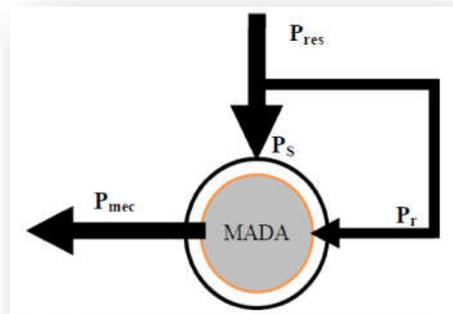


Figure III.3 : Le fonctionnement en mode moteur hyper synchrone

#### Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone:

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- Une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.
- La vitesse de rotation en dessous de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage ne peut pas avoir ce fonctionnement [16].

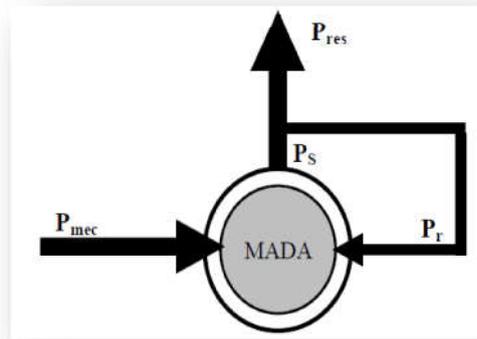


Figure III.4 : Fonctionnement en mode génératrice hypo synchrone

#### Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone:

- La puissance est fournie au réseau par le stator.
- La puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau.
- La vitesse de la machine est au-dessus de la vitesse de synchronisme.
- La machine asynchrone à cage peut fonctionner dans les mêmes conditions mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor [9].

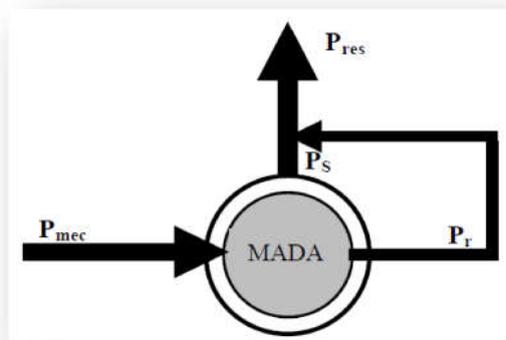


Figure III.5: Fonctionnement en mode génératrice hyper synchrone

#### III.3. Modélisation de la MADA dans le référentiel (d, q) lié au champ tournant :

Nous allons maintenant décrire la modalisation dans un repère tournant diphasé (d, q) lié au champ tournant en utilisant les transformations de Park permettant la conservation des puissances. Soit  $\theta$  l'angle électrique entre l'axe d'un repère diphasé et le repère fixe lié à la phase du stator.

### III.3.1 Modèle de la MADA pour la commande en puissances :

On se propose de modéliser la MADA directement connectée au réseau de distribution par le stator, et alimentée par le rotor au moyen de deux convertisseurs de puissance.

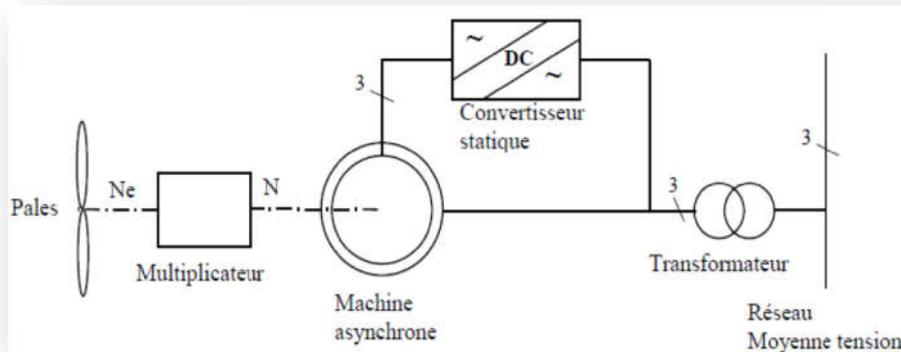


Figure III.6 : la chaîne de conversion de l'éolienne basée sur la MADA

#### Hypothèses simplificatrices :

- L'entrefer constant.
- L'effet des encoches négligé.
- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- L'influence de l'effet de peau et de l'échauffement n'est pas prise en compte.
- Circuit magnétique non saturé et à perméabilité constante.
- Les pertes ferromagnétiques négligeables.

De ce fait, tous les coefficients d'inductance propre sont constants et les coefficients d'inductance mutuelle ne dépendent que de la position des enroulements [5][8].

#### Comportement de la machine asynchrone à double alimentation

- trois bobines statorique ( $S_A, S_B, S_C$ ) décalées entre elles par un angle de ( $120^\circ$ ).
- trois bobines rotorique identique de répartition et similaire à celles du stator, ( $R_a, R_b, R_c$ ).

La figure (III.7) rappelle la position des axes des phases statoriques et rotoriques dans l'espace électrique (l'angle électrique est égal à l'angle réel multiplié par le nombre (p) de paires de pôles par phase).

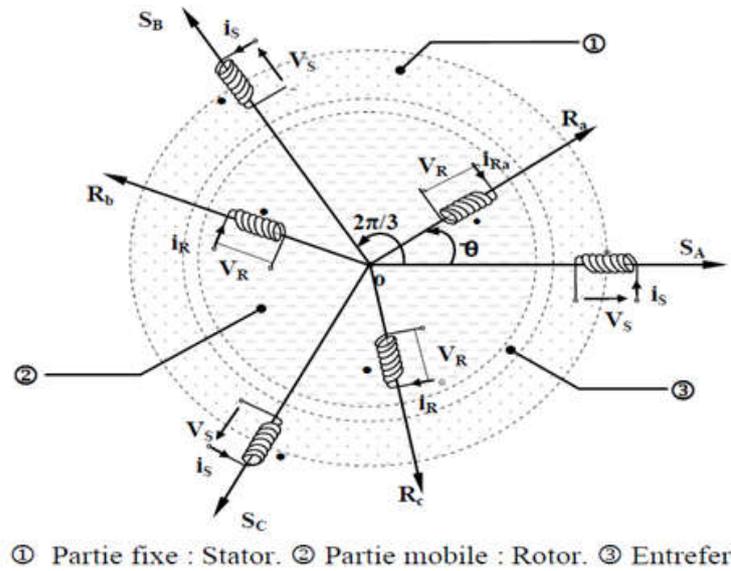


Figure III.7: Représentation simplifiée de la MADA

### Equations électriques de la MADA :

Dans les conditions précédentes les équations sous forme matricielle s'écrivent :

- □ Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (III.6)$$

- □ Pour le rotor:

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (III.7)$$

### Equations magnétiques:

Les équations magnétiques sous forme matricielle sont données par les expressions suivantes :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sabc} \\ \Phi_{rabc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & M_{sr} \\ M_{sr} & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 8})$$

Avec:

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix} [L_r] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$M_{sr} = M_{rs} = M_{max} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{III. 9})$$

### Equation mécanique :

Le couple électromagnétique de la machine peut s'exprimer sous différentes formes.

$$C_{em} - C_r = j \frac{d\omega_m}{dt} + f_v \cdot \omega_m \quad (\text{III. 10})$$

### Transformation de Park :

L'application de la transformation de Park, s'avère nécessaire, cette transformation appliquée aux (courants, tensions, et flux) permet d'obtenir des équations différentielles à coefficients constants.[18]

La matrice de Park est donnée par :

$$[Ap] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 11})$$

Pour les grandeurs statoriques:  $\theta = \theta_s$

Et pour les grandeurs rotorique:  $\theta = \theta_s - \theta_m$  (III. 12)

$$[Ap]^{-1} = \sqrt{2/3} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (III. 13)$$

Le changement de variables relatifs aux (courants, tensions et flux) est défini par la transformation (III.14) :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = [Ap] \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (III. 14)$$

- **Modèle de la machine dans le référentiel (d, q) lié au champ tournant :**

Après l'application de transformation de Park on trouve Le système d'équation (III.15) qui représente le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère (d, q) lié au champ tournant [9], [17].

$$\begin{aligned} V_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} - \omega_s \phi_{ds} \\ V_{dr} &= R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_m) \phi_{qr} \\ V_{qr} &= R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_m) \phi_{dr} \end{aligned} \quad (III.15)$$

Pour les grandeurs statoriques:

$$\theta = \theta_s \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s \quad (III. 16)$$

Et pour les grandeurs rotorique :

$$\theta = \theta_s - \theta_m \Rightarrow \frac{d\theta}{dt} = \frac{d(\theta_s - \theta_m)}{dt} = \omega_s - \omega_m \quad (III. 17)$$

La composante homopolaire du système (III-15) est nulle pour un système équilibré.

### Transformation de Park du flux:

On applique la transformation de Park pour établir les relations entre les flux d'axes (d.q.o) et ceux des axes (a.b.c) on obtient : [17]

$$[\Phi_{dqos}][A_P][\Phi_{sabc}]$$

$$[\Phi_{dqor}][A_P][\Phi_{rabc}] \quad (III.18)$$

Alors :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ds} \\ \Phi_{qs} \\ \Phi_{os} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \\ \Phi_{or} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s - m_s & 0 & 0 & \frac{3}{2}(M_{max}) & 0 & 0 \\ 0 & l_s - m_s & 0 & 0 & \frac{3}{2}(M_{max}) & 0 \\ 0 & 0 & l_s - m_s & 0 & 0 & \frac{3}{2}(M_{max}) \\ \frac{3}{2}(M_{max}) & 0 & 0 & l_r - m_r & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}(M_{max}) & 0 & 0 & l_r - m_r & 0 \\ 0 & 0 & \frac{3}{2}(M_{max}) & 0 & 0 & l_r - m_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{os} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{or} \end{bmatrix} \quad (III.19)$$

Telle que:

$$L_s = l_s - M_s \quad (III.20)$$

$$L_r = l_r - M_r \quad (III.21)$$

Dans la suite, on notera :  $M = \frac{3}{2}M_{max}$  (III.22)

Si on élimine la composante homopolaire du système (III.25) on obtient :

$$\begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \\ \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (III.23)$$

### III.3.2 Commande directe (Mode continu):

La commande directe a vu le jour grâce aux travaux des chercheurs comme Isao Takahashi et Yoshihito Noguchi en 1984 qui lui donna le nom de « Direct Torque Control (DTC) » et Manfred Depenbrock sous le nom de « Direct Self Control (DSC) ». La commande directe est basée sur l'association de la machine et des commutateurs d'électronique de puissance qui la commandent. Contrairement à la commande vectorielle, le changement de repère n'est pas obligatoire pour assurer le découplage entre le flux et le couple, car le découplage est obtenu à travers les commutateurs d'électronique de puissance.

Le principe de fonctionnement de la commande est relativement simple avec trois étapes : on a la partie estimation de flux et de couple, ensuite les contrôleurs par hystérésis et enfin la table de sélection des vecteurs optimaux permet de donner les signaux nécessaires pour commander le convertisseur coté rotor. La figure (III.8) présente le principe de fonctionnement de la commande.

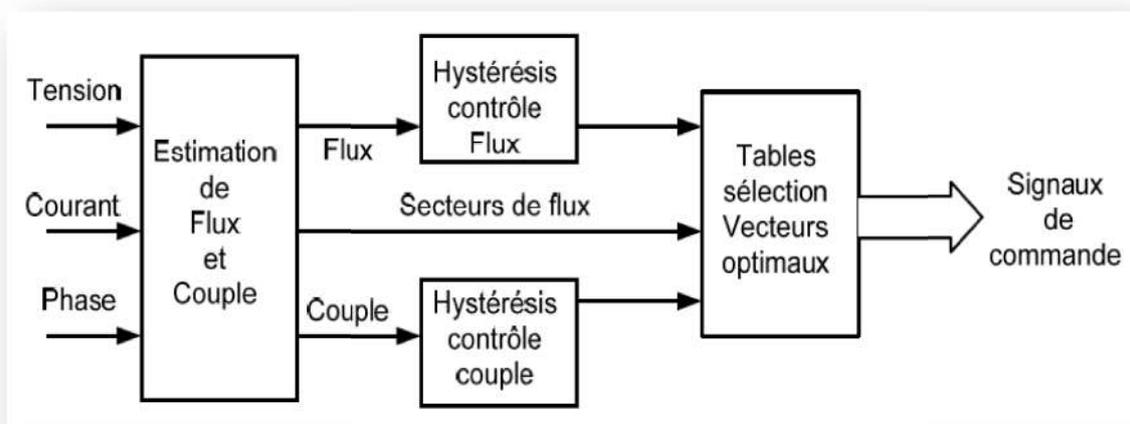


Figure III.8 : Schéma de principe de la commande directe

### III.3.3. Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation :

Dans le but de faire translater les performances de la machine à courant continu à excitation séparée à la machine asynchrone, Blaschke et Hasse ont proposé une méthode du contrôle vectoriel de la machine asynchrone. La commande vectorielle dite aussi « commande à flux orienté » est d'une importance majeure puisqu'elle résout les problèmes du couplage des variables de la machine [19].

Dans ce type de commande, le flux et le couple sont deux variables qui sont découplées et commandées indépendamment.

La plus part des travaux de recherches effectués sur ce sujet utilisent deux méthodes principales :

- Méthode directe développée par Blaschke.
- Méthode indirecte développée par Hasse.

Suivant la source d'énergie Plusieurs techniques ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer [20]:

- Commande en tension ;
- Commande en courant.

Suivant l'orientation du repère (d, q) :

- Le flux rotorique ;
- Le flux statorique ;
- Le flux de l'entrefer ;

Suivant la détermination de la position du flux :

- Directe par mesure ou observation de vecteur flux (module, phase)
- Indirecte par contrôle de la fréquence de glissement.

Dans notre cas, nous nous intéressons à une commande en tension avec orientation du repère (d-q) suivant le flux statorique.

### Principe de la commande vectorielle :

La commande par orientation de flux proposée par Blaschke, est une technique de commande classique pour l'entraînement des machines asynchrones.

L'idée fondamentale de cette méthode de commande est de ramener le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu.

Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux. Afin d'obtenir un contrôle analogue à celui de la machine à courant continu à excitation séparée,  $i_{rd}$  est analogue au courant d'excitation, tandis que le courant  $i_{rq}$  est analogue au courant d'induit. Par conséquent, les deux composantes  $i_{rd}$  et  $i_{rq}$  sont mutuellement découplées.

### Commande vectorielle par orientation du flux statorique :

La machine asynchrone est un système multivariable régi par des équations différentielles. L'utilisation de la transformation de Park par le changement des repères, sous certaines hypothèses, permet de simplifier ces équations et donc d'appréhender une meilleure compréhension des comportements physiques de la machine.

Un choix adéquat du référentiel (d-q) est fait de telle manière que le flux statorique soit aligné avec l'axe (d) permettant d'obtenir une expression de couple dans laquelle deux courants orthogonaux ( $i_{rd}$ ,  $i_{rq}$ ) interviennent, le premier générateur de flux et l'autre générateur de couple.

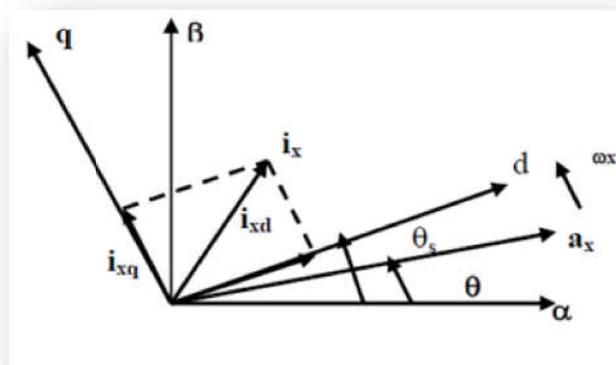


Figure III.9 : principe de la commande vectorielle

En se basant sur l'orientation du flux statorique on peut écrire:

$$\phi_{sd} = \phi_s \text{ et } \phi_{sq} = 0 \quad (III.24)$$

Alors

$$\phi_{sq} = L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rq} = 0 \quad (III.25)$$

$$\text{Impose } I_{sq} = \frac{-M}{L_s} I_{rq} \quad (III.26)$$

En introduisant l'équation (III.26) dans l'expression du flux  $\phi_{rq}$

$$\phi_{rq} = L_r \cdot I_{rq} + M \cdot I_{sq} \quad (III.27)$$

On obtient :

$$\phi_{rq} = \sigma L_r \cdot I_{rq} \quad (III.28)$$

$$C_e = p \frac{M}{L_s} \phi_s \cdot I_{rq} \quad (III.29) \quad \phi_{sd} =$$

$$L_s \cdot I_{sd} + M I_{rd} \text{ , alors} \quad (III.30)$$

$$\phi_s = M \cdot I_{rd} \text{ (} I_{sd} = 0 \text{)} \quad (III.31)$$

En introduisant l'équation (III.31) dans l'expression (III.29) on trouve :

$$C_e = K_t \cdot i_{rd} \cdot i_{rq} \quad (III.32)$$

$$\text{Avec } K_t = \frac{pM^2}{L_s}$$

L'expression (III.32) est analogue à celle du couple d'une machine à courant continu. Ceci permet d'obtenir une commande vectorielle découplée où la composante  $i_{rq}$  contrôle le couple et le flux  $\phi_s$  étant imposé par la composante  $i_r$

Puisque  $\phi_{sd} = \phi_s \text{ et } \phi_{sq} = 0$ , on peut écrire les équations suivantes :

$$\frac{d\phi_s}{dt} = \frac{-1}{T_s} \phi_s + \frac{M}{T_s} i_{rd} \quad (III.33)$$

$$\frac{d\phi_s}{dt} = 0 = -\omega_s \cdot \phi_s + \frac{M}{T_s} + V_{sq} \quad (III.34)$$

$$\frac{dI_{rd}}{dt} = \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot T_s \cdot L_r} \phi_s - \frac{1}{\sigma} \left( \frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{L_s \cdot T_s \cdot L_r} \right) I_{rd} + (\omega_s - \omega) I_{rq} - \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} V_{sd} + \frac{1}{\sigma \cdot L_r} V_{rd} \quad (III.35)$$

$$\frac{dI_{rq}}{dt} = \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} \omega \cdot \phi_s - (\omega_s - \omega) I_{rd} - \frac{1}{\sigma} \left( \frac{1}{T_r} + \frac{M^2}{L_s \cdot T_s \cdot L_r} \right) I_{rq} - \frac{M}{\sigma \cdot L_s \cdot L_r} V_{sq} + \frac{1}{\sigma \cdot L_r} V_{rq} \quad (III.36)$$

$$I_{rd} = \frac{\phi_s^*}{M} \quad (III.37)$$

D'après le système d'équations (III.8) :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s = \frac{\frac{R_s \cdot M}{L_s} I_{rq} + V_{sq}}{\phi_s^*} \quad (III.38)$$

Et d'après l'équation (III.29) :

$$I_{rq} = \frac{C_e^*}{K_t \phi_s^*} \quad (III.39)$$

- Les types de Commande vectorielle :

**Commande vectorielle directe :**

Dans la méthode directe, le flux statorique est régulé par une boucle de contre réaction, ce qui nécessite sa mesure ou son estimation qui doit être vérifiée quel que soit le régime transitoire effectué. Il faut donc procéder à une série de mesures. Dans son essence, la commande vectorielle directe doit être réalisée par la mesure du flux qui nécessite l'utilisation de capteur placé dans l'entrefer de la machine, opération généralement délicate à réaliser [21].

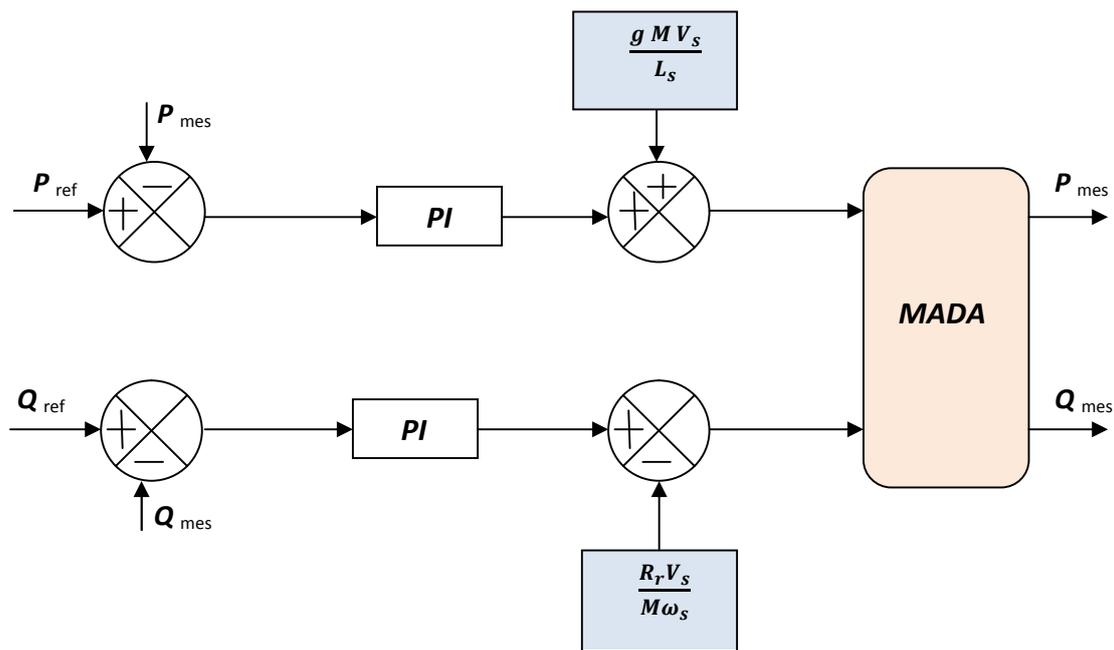


Figure III.10 : schéma bloc de la commande directe en puissance de la MADA

**Commande vectorielle indirecte :**

Comme la vitesse est mesurée, il est donc aisé de faire sa régulation par contre-réaction en utilisant un régulateur PI. La méthode indirecte est plus facile à implanter, mais elle est fortement dépendante des variations des paramètres de la machine due à la saturation magnétique et à la variation de température surtout pour la constante de temps rotorique [21].

Les équations (III.37), (III.39) mettent en évidence le courant  $I_{rd}$  générateur de flux et le courant  $I_{rq}$  générateur du couple. Cela offre la possibilité de contrôler la machine.

### III.4 Modélisation et control d'un onduleur de tension et redresseur :

Dans cette partie, nous nous intéressons à la modélisation de convertisseur de puissance qui sont constitué de composants IGBT et de DIODE montées en antiparallèles. Le rotor de la MADA est connecté au bus continu par l'intermédiaire d'un onduleur de tension. La tension de sortie de ce dernier est contrôlée par technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui permet le réglage simultané de la fréquence et la tension de sortie de l'onduleur.

#### III.4.1 Onduleur de tension :

Les onduleurs de tension alimentent les machines à courant alternatif (charge) à partir d'une source de tension continue. Ils permettent d'imposer aux bornes de la machine (charge) des tensions d'amplitude et de fréquence réglable par la commande.

Un onduleur de tension à trois bras comprenant chacun deux cellules de commutation. Chaque cellule est composée d'un interrupteur, commandé à l'amorçage et au blocage et d'une diode montée en antiparallèle.

- **Modélisation des onduleurs de tension :**

Pour modéliser l'onduleur de tension Figure (III.11), on considère son alimentation comme une source parfaite, supposée d'être de deux générateurs de F.E.M égale à  $U_0/2$  connectés entre eux par un point noté  $n_0$ .

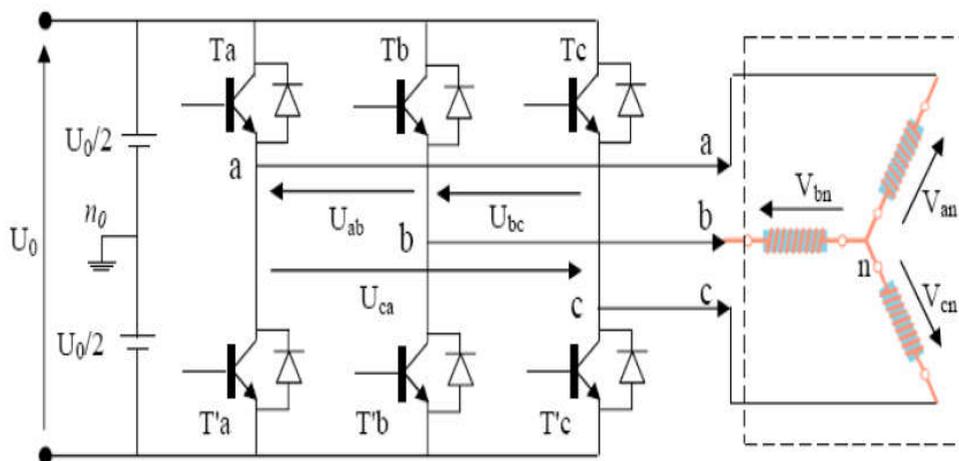


Figure III.11 : Schéma de l'onduleur triphasé [21]

La charge a été modélisée à partir des tensions simples que nous notons  $V_{an}, V_{bn}$  et  $V_{cn}$ .

L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques  $S_i$ . On appelle  $T_i$  et  $T_i'$  est un composant électronique (supposée des interrupteurs idéaux), on a :

- Si  $S_i = 1$ , Alors  $T_i$  est passant et  $T_i'$  est ouvert
- Si  $S_i = 0$ , Alors  $T_i$  est ouvert et  $T_i'$  est passant

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an0} - V_{bn0} \\ U_{bc} = V_{bn0} - V_{cn0} \\ U_{ca} = V_{cn0} - V_{an0} \end{cases} \quad (III. 40)$$

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle, donc

$$\begin{cases} V_{an} = (1/3)[U_{ab} - U_{ca}] \\ V_{bn} = (1/3)[U_{bc} - U_{ab}] \\ V_{cn} = (1/3)[U_{ca} - U_{bc}] \end{cases} \quad (III. 41)$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la tension du neutre de la charge par rapport au point de référence  $n_0$

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn0} = V_{an0} \\ V_{bn} + V_{nn0} = V_{bn0} \\ V_{cn} + V_{nn0} = V_{cn0} \end{cases} \quad (III. 42)$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{nn0} = \left(\frac{1}{3}\right) [V_{an0} + V_{bn0} + V_{cn0}] \quad (III. 43)$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits  $\Leftrightarrow S_i (i = a, b, c)$

$$\text{On a: } V_{in0} = S_i U_0 - \frac{U_0}{2} \quad (III. 44)$$

On a donc :

$$\begin{cases} V_{an0} = (S_a - 0.5)U_0 \\ V_{bn0} = (S_b - 0.5)U_0 \\ V_{cn0} = (S_c - 0.5)U_0 \end{cases} \quad (III. 45)$$

En remplaçant (III.25) dans (III.23), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{an0} + \frac{2}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} + \frac{2}{3}V_{cn0} \end{cases} \quad (III.46)$$

En remplaçant (III.25) dans (III.26), on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}U_0 \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (III.47)$$

### Contrôle du courant par M.L.I :

La méthode de contrôle des courants par modulation de largeur d'impulsion (M.L.I) à partir d'une source de tension continue, consiste à imposer aux bornes de la machine des créneaux de tension de manière que la fondamentale de la tension soit le plus proche de la référence de la tension sinusoïdale.

La M.L.I. est obtenue par la comparaison de deux signaux: Un signal triangulaire de haute fréquence ( $F_p$ ) appelé "porteuse" et un signal de référence appelé "modulatrice", de fréquence  $F_m \ll F_p$ . Les intersections de ces deux signaux déterminent les instants de commutation des interrupteurs de l'onduleur. Figure III.9

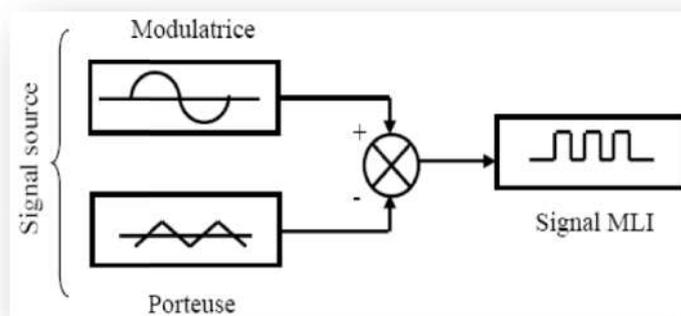


Figure III.12 : Schéma synoptique d'un MLI [22]

Ces deux signaux sont définis comme étant :

- **L'onde porteuse:** qui est signal à haute fréquence (en général, une onde triangulaire).
- **L'onde modulatrice:** qui est un signal image de l'onde de sortie recherchée. (En général une onde sinusoïdale).

Deux principaux paramètres caractérisant la MLI, sont.

- **L'indice de modulation  $ML$  :** qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulatrice à celle de l'onde porteuse :

$$M_L = \frac{V_m}{V_p} \quad (III.48)$$

- **Le rapport de modulation  $Mr$ :** qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulatrice:

$$M_r = \frac{F_p}{F_m} \quad (III.49)$$

### MLI à échantillonnage naturel :

L'échantillonnage naturel, est un processus de sélection naturelle des points échantillonnés, c'est la technique la plus utilisée et la plus simple, consiste à comparer le signal triangulaire (porteuse) avec un signal sinusoïdal (Modulateur). L'intersection de ces deux signaux définit les instants de commutation des interrupteurs.

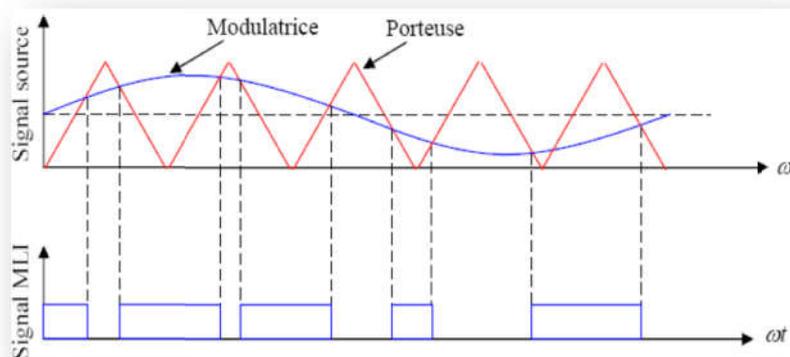
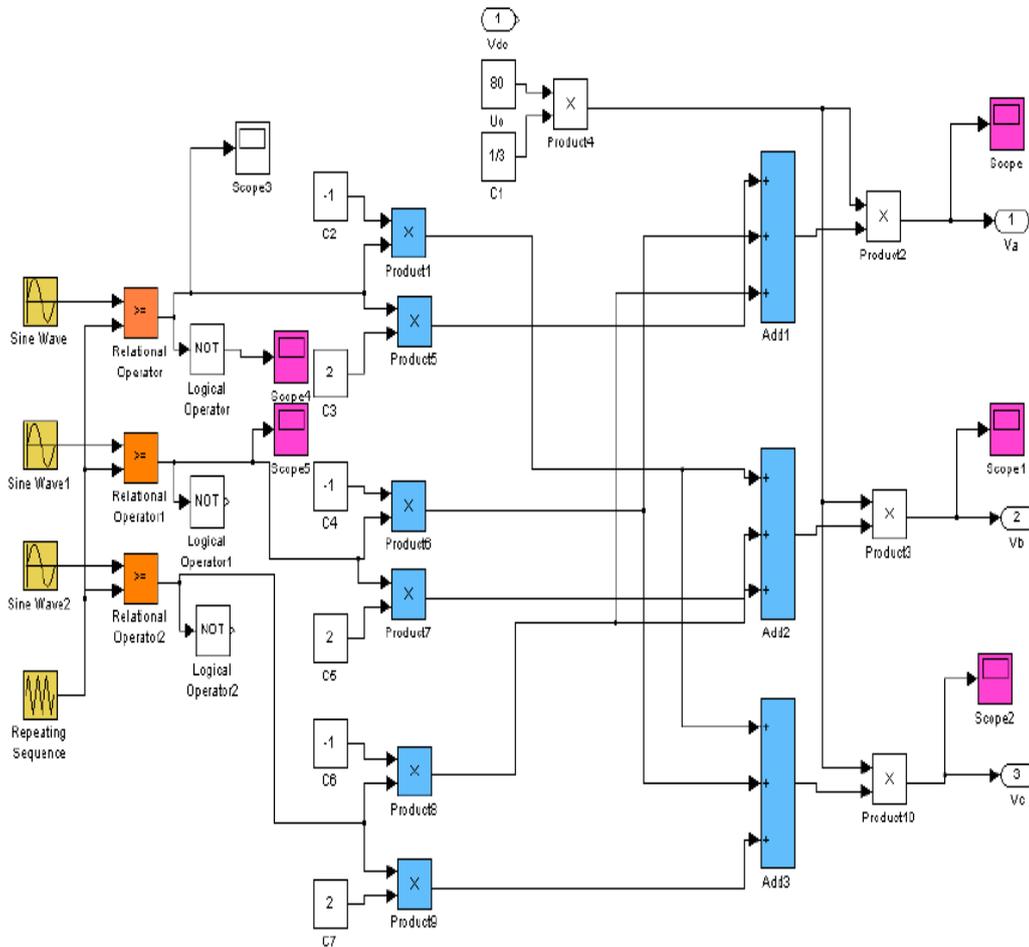


Figure III.13 : M.L.I à échantillonnage naturel [22]

**Bloc de simulation de l'onduleur de tension :**



**Figure III.14 : bloc de simulation de l'onduleur de tension**

- **Modulation de Largeur d'Impulsions Sinus-triangle :**

Les grandeurs de sortie des commandes analogiques ou numériques de l'onduleur, servent à obtenir les tensions ou courants désirés aux bornes de la machine. La technique de modulation de largeur d'impulsions (M.L.I.) permet de reconstituer ces grandeurs à partir d'une source à fréquence fixe et tension fixe (en général une tension continue) [27].

Celui-ci réalise les liaisons électriques entre la source et la charge. Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs et par leurs séquences de fonctionnement.

Dans la majorité des cas, l'onde idéale est sinusoïdale. La M.L.I. permet de se rapprocher du signal désiré et de faire varier la valeur fondamentale de la tension de sortie, elle repousse les harmoniques de la tension de sortie vers les fréquences les plus élevées, ce qui facilite le filtrage. Cependant, cette technique possède un inconvénient : (le contenu harmonique généré par une onde M.L.I. entraîne des pertes dans le réseau ainsi que dans la charge, elles génèrent dans les machines tournantes des oscillations de couple, des bruits acoustiques et des résonances électromécaniques, elle injecte du bruit sur la commande et introduit des non linéarités qui peuvent déstabiliser le système. Donc il faut essayer de minimiser ces harmoniques).

- **Modulation sinus triangle :**

**Principe de la technique :**

La M.L.I. sinus/triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. La fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. En triphasé, les trois références sinusoïdales sont déphasées de  $2\pi/3$  à la même fréquence [27].

La porteuse étant triangulaire, il y a proportionnalité entre  $V_{ref}$  et le temps  $t$  de fermeture de l'interrupteur.

**Propriétés :**

Si la référence est sinusoïdale, on définit trois grandeurs :

- l'indice de modulation  $I_m$  égale au rapport de la fréquence de modulation (porteuse) sur la fréquence de référence (modulante).

$$I_m = \frac{f_p}{f_m} \tag{III. 50}$$

- Le taux de modulation  $T_m$  est égal au rapport de l'amplitude de la modulante sur celle de la porteuse

$$T_m = \frac{A_p}{A_m} \quad (\text{III. 51})$$

- L'angle de calage  $\delta$  (pour une M.L.I. synchrone).

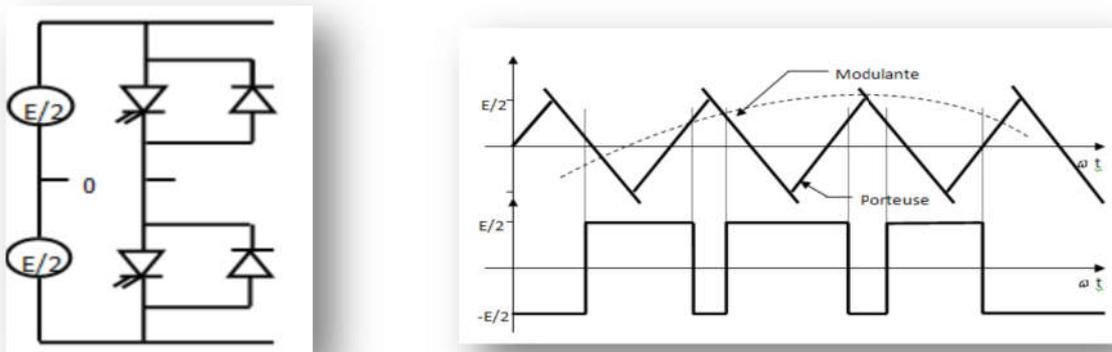


Figure III.15 : M.L.I. sinus triangle

L'augmentation de  $I_m$  rejette les premiers harmoniques non nuls vers les fréquences élevées et facilite donc le filtrage. Mais,  $I_m$  est limité par les temps des commutations des interrupteurs du convertisseur et donc par la largeur minimale des impulsions [21].

En particulier, pour une modulation asynchrone, la minimisation des sous-harmoniques implique un indice de modulation élevé incompatible avec une fréquence de référence élevé.

Si  $I_m$  est assez grand ( $>6$ ), la valeur efficace de la tension de sortie est pratiquement égale à la tension de référence pour  $t_m = 1$  :

Par action sur  $t_m$ , on peut théoriquement faire croître l'amplitude de la fondamentale.

Cette M.L.I. est particulièrement bien adaptée à l'électronique analogique mais est difficilement utilisable en numérique [26].

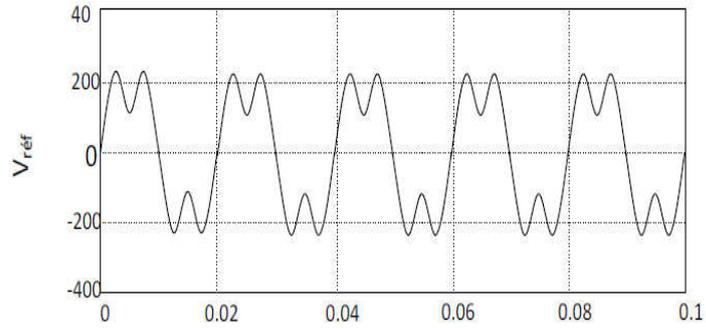


Figure III.16 : Injection d'un harmonique de rang 3

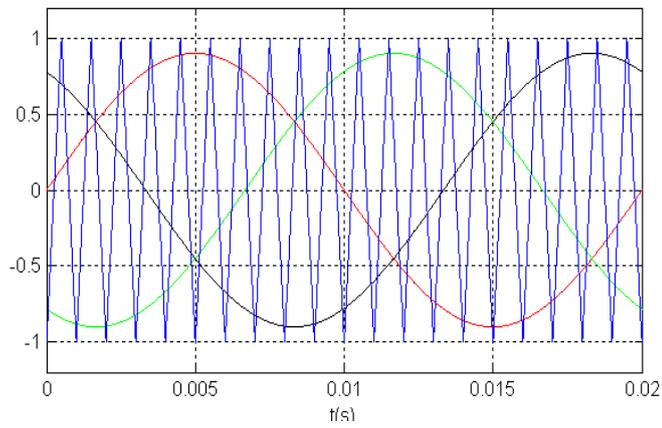


Figure III.17 : Les tensions :  $V_{r1}$ ,  $V_{r2}$ ,  $V_{r3}$  et  $P_r$

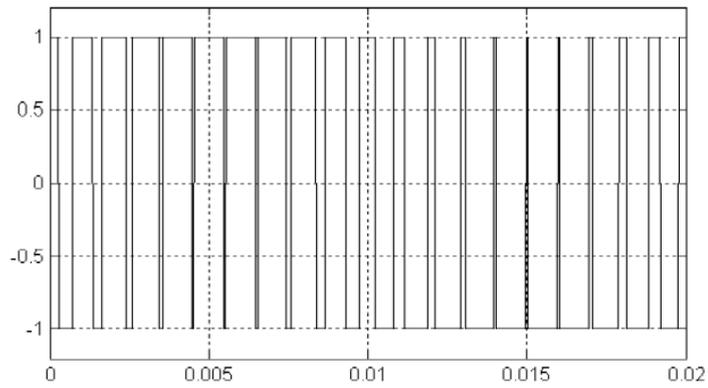


Figure III.18 : Le signal de l'intersection  $S_1$  entre  $V_{r1}$  avec  $P_r$

### III.4.2. Redresseur à MLI de Tension :

Avant de modéliser le redresseur à MLI, il est utile de rappeler qu'un redresseur est un convertisseur statique. Il sert comme son nom l'indique à redresser un signal alternatif en un signal continu.

Pour l'étude de l'ensemble (génératrice - redresseur MLI – onduleur - charge), on s'intéressera uniquement au comportement dynamique des variables électriques et mécaniques de la machine [23].

Le redresseur à MLI est composé de six bras, dont chacun comporte deux cellules de commutation permettant de faire passer le courant dans les deux sens.

Contrairement à un redresseur à diodes qui fournit une valeur de la tension égale à celle de la tension redressée (interrupteurs idéaux), le redresseur à MLI doit fournir une tension constante quel que soit la tension produite par la génératrice [25].

Pour le modèle dynamique du système, on va diviser l'étude du convertisseur en trois parties: le côté alternatif, la partie discontinue composée par les interrupteurs, et le côté continu. Dans ce contexte, la fonction des interrupteurs est d'établir une liaison entre le côté alternatif et le bus continu. Ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante :

$$S = \begin{cases} +1, & s_{ij} = -1 \\ -1, & s_{ij} = +1 \end{cases} j \in \{a, b, c\} \quad (III.52)$$

Les tensions de phase d'entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction des fonctions  $S_j$  de la tension redressée  $U_{dc}$  et les courants d'entrée  $i_a, i_b, i_c$

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (III.53)$$

Les tensions d'entrée entre phases du redresseur MLI peuvent être décrites par :

$$U_{Sab} = (S_a - S_b) \cdot U_{dc} \quad (III.54)$$

- **Techniques de commande MLI :**

Le principe de la technique de modulation de largeur d'impulsion est basé sur la comparaison d'un signal modulant avec la porteuse.

La technique choisie pour la commande de nos convertisseurs est la M.L.I sinus-triangle. Elle est basée sur la comparaison d'un signal triangulaire de grande fréquence et d'un signal sinusoïdal de la même fréquence que le signal de référence que l'on souhaite obtenir.

Ces signaux ont les propriétés suivantes :

- La modulante est une onde sinusoïdale  $v_{ref}(t)$  d'amplitude  $u_r$  et de fréquence  $f_r$
- La porteuse est une onde triangulaire ou en dents de scie  $v_p(t)$ , d'amplitude  $|u_p| \geq |u_r|$ , et d'une fréquence  $f_p \gg f_r$ .
- L'indice de modulation  $m = \frac{f_p}{f_r}$
- Le coefficient de réglage en tension  $r$ , qui est égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à celle de la porteuse  $r = \frac{u_r}{u_p}$ .

Le principe de cette commande est que la valeur de la fonction  $F$  qui correspond à la première cellule de commutation soit égale à 1 si  $u_p \geq u_r$  sinon elle prend la valeur zéro. La valeur des autres fonctions se déduit facilement par la complémentarité qui existe entre deux cellules d'un même bras et le décalage de  $\frac{2\pi}{3}$  pour deux phases qui se suivent [24].

### III.5 Validation du model de commande Coté Machine :

#### III.5.1 Etude du régulateur (PI):

Les régulateurs classiques permettent de contrôler la précision et la rapidité des systèmes asservis, ils sont le précis dans l'industrie. Nous avons travaillé avec deux régulateur, Régulateur Proportionnelle-Intégral PI et régulateur Intégral-Proportionnelle IP.

- **Régulateur de vitesse de la turbine:**

#### Régulateur PI :

Notre système est corrigé par un régulateur de type proportionnel intégral (PI) dont la fonction de transfert est de la forme  $\left[ K_p + \frac{K_i}{S} \right]$ . La figure III.19 montre l'asservissement de la vitesse  $\Omega_{m-ref}$  en boucle fermé

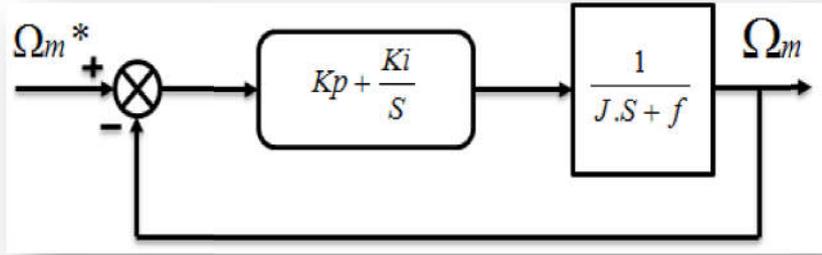


Figure III.19 : Système à régulé par PI

- **Régulation de puissance :**

Le schéma bloc de régulation de puissance active et réactive avec un régulateur PI représente par la figure III.20.

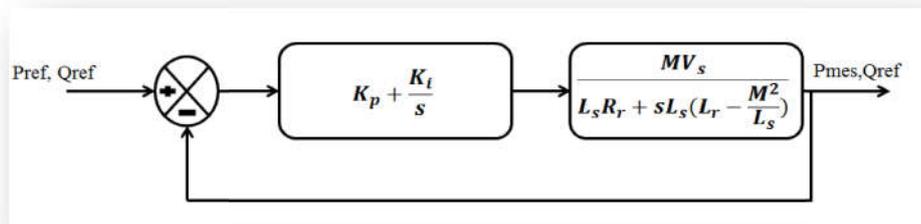


Figure III.20 : Schéma d'un Régulateur PI de puissance

- **Régulation de vitesse :**

Le régulateur de vitesse permet de déterminer couple de référence, afin de maintenir la vitesse correspondant.

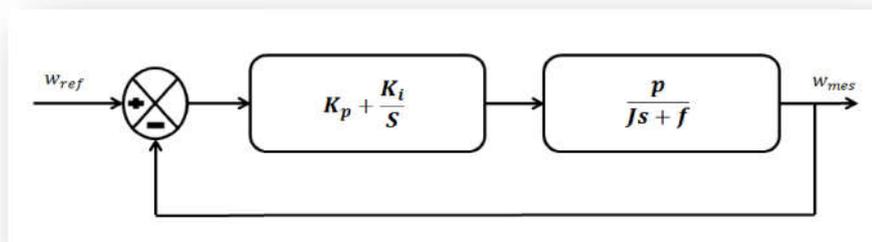
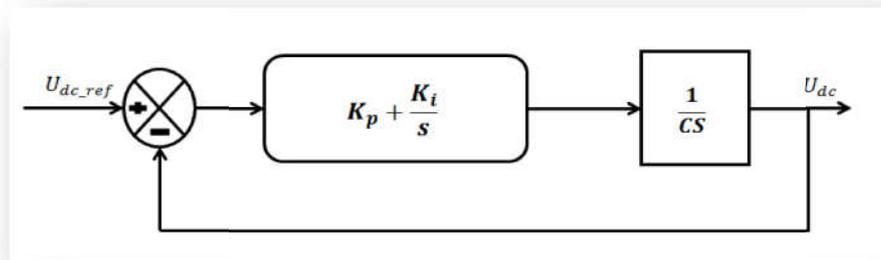


Figure III.21 : Schémas d'un régulateur PI de vitesse.

- **Régulation de la tension du bus continue  $U_{ds}$  :**

La régulation des transites de puissance permet d'imposer le courant capacitif au bus continu. Le réglage du bus continu est alors réalisée au moyen d'une boucle de régulation, permet de maintenir une tension constante du bus continue, avec deux types de correcteur PI et IP générant la référence de la tension a injecté dans le condensateur C.

Il est à noter que le réglage du bus continu est donc réalisé par une boucle externe de régulation



*Figure.III.22 : Commande en boucle fermée de la tension*

*Du bus continu avec régulateur PI*

**III.5.2. Résultats de simulation :**

Dans cette partie on a fait la simulation et la modélisation de la machine asynchrone à double alimentation à rotor bobiné en mode continu avec la commande direct en puissance.

Les résultats de la simulation sous MATLAB Sim power système du modèle de la MADA qui est basé sur les équations obtenues avec la transformation de Park (plan d-q) liée au champ tournant sont montrés sur les figures ci-dessous. Ces résultats sont obtenus pour le modèle d'une machine asynchrone à double alimentation, de puissance de 5KW, alimentée directement par deux sources de tension triphasées, l'une au niveau du stator avec une fréquence du réseau qui est de 50Hz et d'amplitudes de 230 Volts et l'autre au niveau du rotor avec un amplitude de 400Volts continue et une fréquence rotorique.

- **Commande directe (Mode continu) :**

Le schéma bloc en mode continue de la commande directe en puissance est représenté par la figure II-

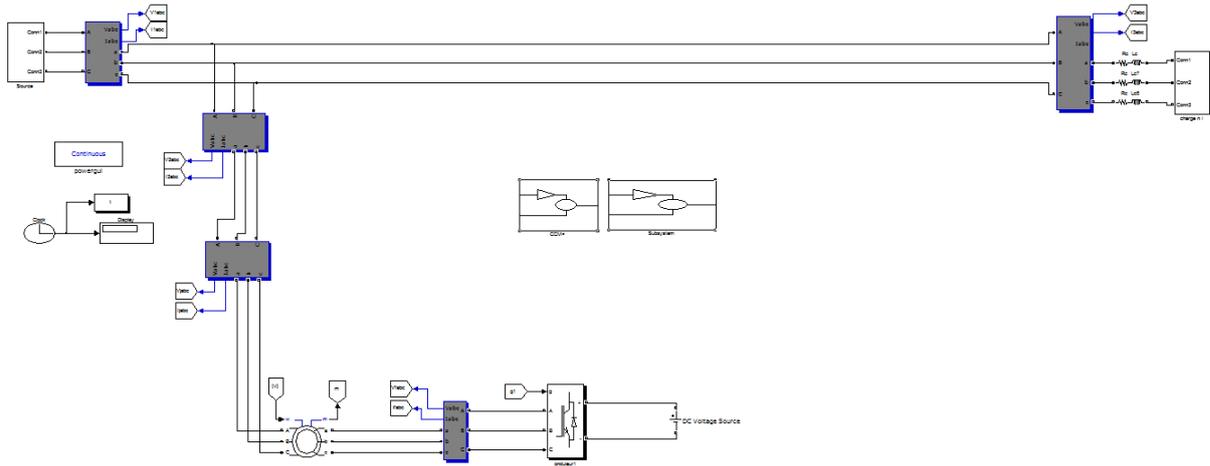


Figure III.23 : Modèle de simulation : (Réseau électrique « source triphasé équilibré » + éolienne « MADA » + charge non linéaire)

Résultat de simulation avec régulateur PI :

Les résultats de simulation illustrés dans les figures ci-dessous sont ceux obtenus par le modèle d'une machine de puissance 5Kw.

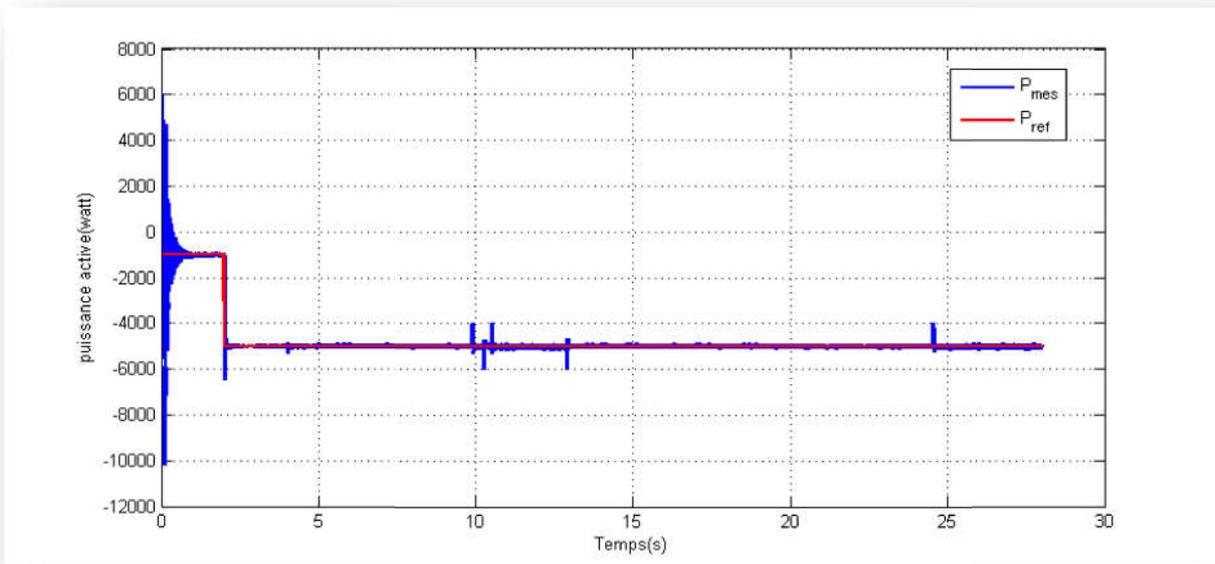
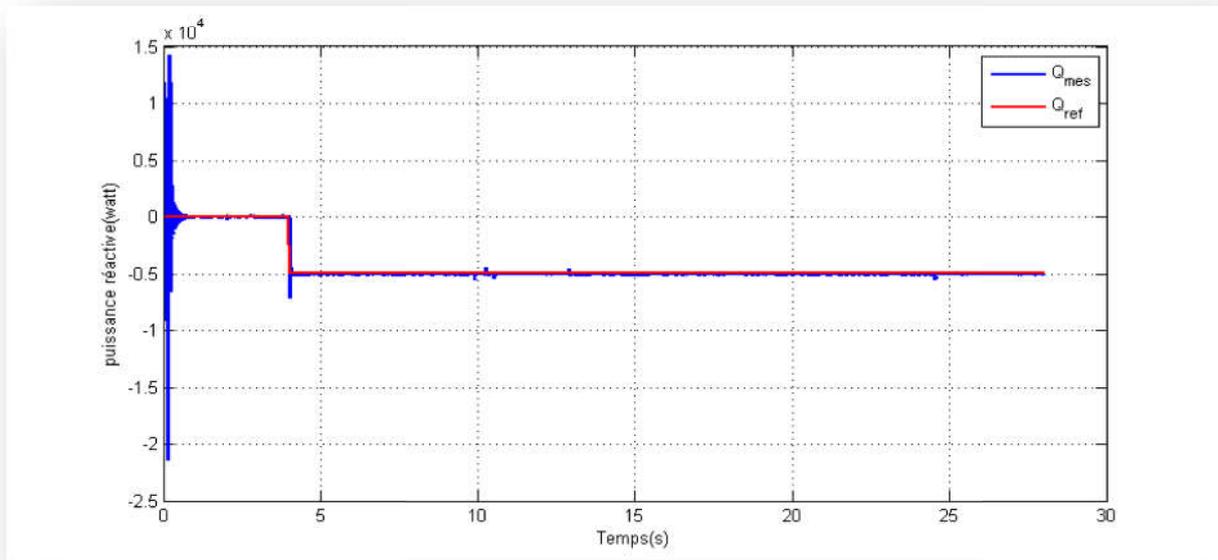


Figure III.24 : Puissance active P(Watt) avec régulateur PI



III.25 : Puissance réactive  $Q$  (VAR) avec régulateur PI La vitesse  $w_m$ :

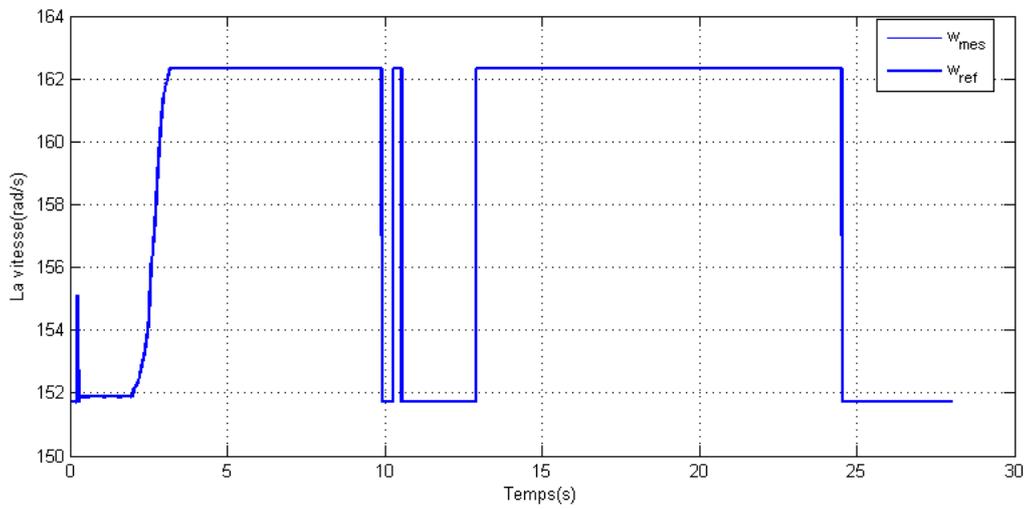
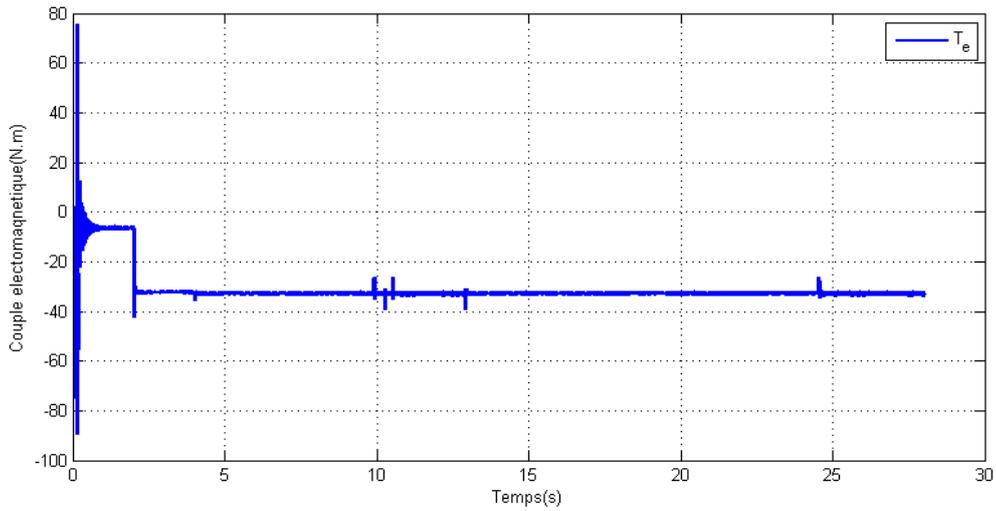


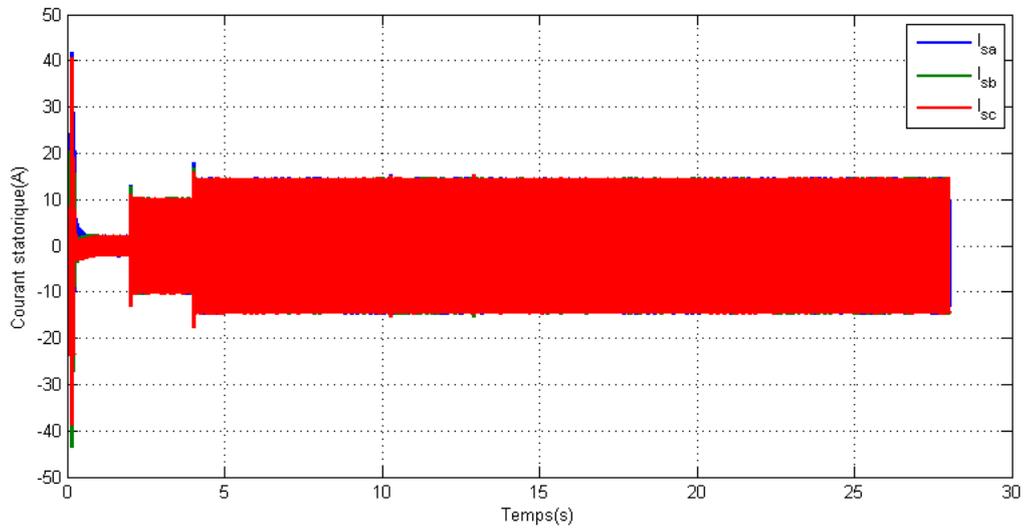
Figure III.26 : Vitesse de la MADA  $w_m$  (rad/s) avec régulateur PI

**Le couple électromagnétique  $T_e$  :**

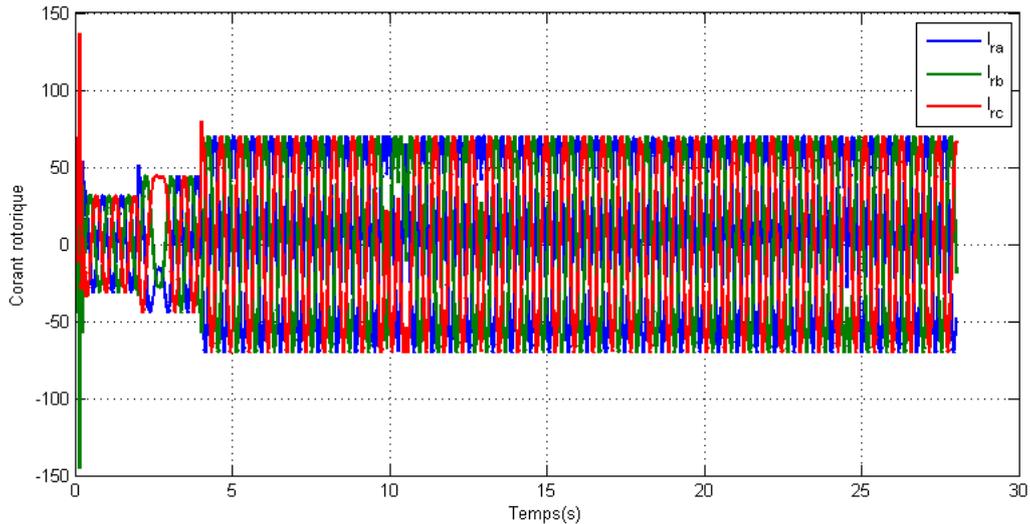


*Figure III.27 : Le couple électromagnétique  $T_e$  (N.m) avec régulateur PI*

**Les courants statorique  $I_s$  (A):**



*Figure III.28 : Courants statorique  $I_{sa}$ ,  $I_{sb}$ ,  $I_{sc}$  (A) avec régulateur PI.*



**Figure III.29 : Courants rotorique  $I_{ra}$ ,  $I_{rb}$ ,  $I_{rc}$  (A) avec régulateur PI.**

Les résultats de simulation de la machine asynchrone à double alimentation et présentée sur les figures (III.24), (III.25), (III.26), (III.27), (III.28), (III.29), concernant respectivement la puissance active et la puissance réactive, les composantes des courants statoriques, les tensions statoriques, le couple électromagnétique et la vitesse.

Dans cet essai, nous allons observer le comportement des puissances débitées par la MADA dans le cas où un échelon de puissance lui est imposé:

A  $t=2$ s pour la puissance active et à  $t=4$ s pour la puissance réactive.

Un échelon de vitesse est appliqué à  $t=6$ s

Les résultats de simulation obtenus :

– on remarque que la puissance active qui est présenté sur la figure III.24 présente un régime transitoire qui est fixé après une durée de 1s avec des pics ( $P_{\max}=6.5.10^3$  et  $P_{\min}=-9.10^3$ ), à l'application de échelon (la consigne) à  $t = 2$  s au système tel que la puissance passe de (-1000 à -5000 Watt), remarquons aussi un suivie de consigne sur la même Figure montre que la puissance débitée par la MADA atteint bien la valeur désirée (-5000Watt) sauf une perturbation(dépassement) d'une période de 0.5s (1.5s-1s) dû à l'application d'une puissance réactive à  $t=4$  s.

– Il en est de même pour la puissance réactive (Figure III.25), on a constaté un suivi de consigne. Il y a une réponse à l'échelon introduit à 4 s pour atteindre la valeur souhaitée (-5000 Watt).

– La Figure III.27 montrent que pendant le régime dynamique, le couple électromagnétique est négatif, il atteint au démarrage une valeur maximale (N.m). On constate ainsi l'importance des courants statoriques (Figure III.28) et rotoriques (Figure III.29) pendant le démarrage, après un temps égal à environ 6 s, ils se stabilisent.

### **III.6 Conclusion :**

Dans ce chapitre on a modélisé le système global d'une éolienne de 5kW de puissance à vitesse variable. Cette modélisation nous a montré un fort couplage entre les puissances actives et réactive.

Ce chapitre a été consacré à la génératrice asynchrone à double alimentation. Nous avons donné les équations électriques, magnétiques et mécaniques régissant la MADA. L'écriture de ces équations dans le repère de Park a été exploitée pour effectuer la commande vectorielle qui permet d'assimiler la MADA afin de faciliter son étude et notamment sa simulation sous Matlab-Simulink.

## *Conclusion générale*

## ***Conclusion générale***

---

Dans le cadre de la réalisation du mémoire de master, nous avons choisi de travailler sur le thème étude et simulation d'une machine asynchrone à double alimentation. Pour cela, nous avons pris pour objectif l'étude et la simulation d'une chaîne de conversion éolienne constituée d'une turbine associée à une génératrice asynchrone. Cet ensemble de conversion de l'énergie éolienne est complété par un dispositif d'électronique de puissance afin de transmettre l'énergie électrique produite vers le réseau ou l Dans ce chapitre, nous nous sommes présenté les différents types d'énergies renouvelables et les différents éoliens est leur principe de fonctionnement d'une manière générale ainsi que les différentes structures.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les différents types d'énergies renouvelables et les différents éoliens est leur principe de fonctionnement d'une manière générale ainsi que les différentes structures.

Dans le chapitre deux, nous avons modélisé le vent qui est la source principale d'énergie. Nous avons ensuite modélisé la turbine éolienne sur laquelle se base notre étude. Une commande de la turbine MPPT, de sorte à ce que le coefficient de puissance soit toujours optimal quelques soient les variations du vent, a été effectuée grâce à une vitesse du vent fixe puis une vitesse du vent variable, quelques résultats de simulation ont été ensuite donnés. Afin de comparer les performances de chacun des deux.

Le chapitre trois a été consacré à la génératrice asynchrone à double alimentation. Nous avons donné les équations électriques, magnétiques et mécaniques régissant la MADA. L'écriture de ces équations dans le repère de Park a été exploitée pour effectuer la commande vectorielle qui permet d'assimiler la MADA afin de faciliter son étude et notamment sa simulation sous Matlab-Simulink.

Nous avons donc abordé un sujet qui est en plein développement, la commande de MADA est d'actualité. Cette thématique est nouvelle et nous sommes heureux d'avoir pu aboutir au terme d'une année de recherche a des résultats de simulation effectué sur Matlab/Simpowersystems en direct avec des résultats conclurons pouvant être utilisés pour poursuivre les essais et envisage d'autres fonctionnements.

Enfin, dans ce travail nous nous sommes limités à l'application des conditions optimisées, pendant la réalisation du dépôt sur le silicium, pour l'obtention des matrices de silicium imprégnées par un alliage métallique.

## ***Conclusion générale***

---

Ce travail n'est pas encore finalisé, une caractérisation magnétique des différents dépôts obtenus doit être effectuée. Les propriétés magnétiques des couches déposées à l'échelle nanométrique sont d'une grande importance de systèmes et dispositifs de stockage lecture, ... etc. Les systèmes de faibles dimensions offrent la possibilité d'induire des phénomènes nouveaux et exotiques telle qu'une augmentation spectaculaire du moment magnétique. Le magnétisme de ces systèmes de basse dimensionnalité est d'une importance fondamentale dans les applications technologiques, comme le sont les dispositifs à enregistrement de haute densité ou les capteurs magnétiques à haute sensibilité.

# Bibliographie

- [1] [https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/le-renouvelable-seconde-source-d-electricite-en-2016\\_10537](https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/le-renouvelable-seconde-source-d-electricite-en-2016_10537)
- [2] Source : notre-planete.info, [http://www.notre-planete.info/actualites/actu\\_3765\\_energie-renouvelables-2012.php](http://www.notre-planete.info/actualites/actu_3765_energie-renouvelables-2012.php) « Le formidable avenir souvent trop méconnu de l'énergie éolienne ».
- [3].<https://www.evwind.es/tags/world-wind-energy-association>
- [4] [www.maghrebemergent.com/energie/renouvelable/.../38807-1-algerie-ina...](http://www.maghrebemergent.com/energie/renouvelable/.../38807-1-algerie-ina...)  
« L'Algérie inaugure sa première ferme éolienne de 10 ».
- [5] S.El Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau moyenne tension », Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille (ECL) Cohabité avec l'Université des Sciences et Technologie de Lille 1 (USTL), Lille, France, 2004.
- [6] A. Tounzi, "Utilisation de l'Energie Eolienne dans la Production de l'Electricité", Revue 3EI, Mars 2000,
- [7] D. Schreiber, "State of art of variable speed wind turbines", 11th International symposium on power electronics – Ee 2001, Novi Sad, Oct.-Nov. 2001, CDROM proceedings.
- [8] O. GERGAUD, Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur, Thèse (2002), école Normale Supérieure de Cachan, France.
- [9] G.DJAMEL et A.SAMIR .Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation, Mémoire d'ingénieur Université Abderrahmane Mira de Bejaia ,2007.
- [10] P.Leeconte, M.Rapin, E.Szechenyi « éolienne »,Technique de l'ingénieur, BM 4640.
- [11] M.S.Abdoulaziz, Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne, Mémoire d'ingénieur Ecole Nationale Polytechnique d'Alger,2007.
- [12] Panos M. Pardalos , Steffen Rebennack Mario V. F. Pereira et Niko A. Iliadis Vijay Pappu Editors« Handbook of Wind Power Systems» Springer.
- [13] A. Diop « Contribution au développement d'un simulateur électromécanique d'aérogénérateurs: Simulation et commande en temps réel d'une turbine de puissance moyenne à angle de calage variable », Thèse de Doctorat de l'Université du Havre, 1999.
- [14] N. Laverdure « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » ; thèse doctorat de l'INPG ; Spécialisé : Génie électrique ; 09 décembre 2005.
- [15] A.BOYETTE, « contrôle et commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec un système de stockage pour la production éolienne», thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.

- [16] M.MESSAOUD, « Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone a aimants Permanents », Mémoire de Magister, Université de Batna ,2008.
- [17] N.GHEDBANE ET A.MEDJADI, « Commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation à base d'un régulateur RST », Mémoire d'ingénieur université Med Boudiaf de M'sila ,2005.
- [18] K.SEDDIK ET M.CHOUAIB, « réglage des puissances active et réactive de la génératrice asynchrone par des régulateurs en mode de glissant », thèse d'ingénieur université Med Boudiaf de M'sila ,2005.
- [19] Blasco-Gimenez, R- Asher G.M.-Sumner M.- Bradley K.J. « Dynamic performance Limitations for MRAS based sensorless induction motor drives» Part 1: Stability Analysis for the Closed Loop Drive . IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol 143, N° 2, pp.113-122, March 1996.
- [20] VAS.P «Vector Control of AC Machine» Ed Oxford University Press, 1990.
- [21] Babak, N. « Commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones a aimants: méthodes, convergence, robustesse, identification "en ligne" des paramètres». Thèse de Doctorat l'Université de Téhéran, Iran, 2001.
- [22] M.S. Merzoug , «Etude comparative des performances d'un DTC et d'un FOC d'une Machine synchrone à aimants permanents (MSAP) », Mémoire Magister Université de Batna, 2008.
- [23] J. Larouche, «Cours et exercices corrigés, Livre de l'électronique de puissance et des convertisseurs », Lycée E. Belin de Visoul 2003.
- [24]G. Segulier,F. Labrique, « Les convertisseurs de l'électronique de puissance », Edition Lavoisier, Tech and Doc, 1998, tome 1 et tome 4.
- [25] M. Chinchilla, J.C. Burgos, « Control of permanent magnet generator applied to variable speed wind energy systems connected to the grid », IEEE Transactions on energy conversion, Vol 1, pp.130-135, March 2006.
- [26] centrale photovoltaïque « Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets», ISBN 3-905232-26-X.
- [27] T. S. Wu, M. D. Beller, A. Tehamdjou, J. Mahadavi, and M. Ehsani, «A review of soft-switched dc-ac converters ». IEEE Trans. IAS, vol. 34, pp. 847–860, July/August 1998.
- [28] Thierno Lamarana SOW, «COMMANDE NON LINÉAIRE DE L'ÉOLIENNE À MADA POUR UNE PARTICIPATION AU RÉGLAGE DE LA FRÉQUENCE DU RÉSEAU», UNIVERSITÉ DU QUÉBEC 2012.

# *Annexes*

## Annexe A

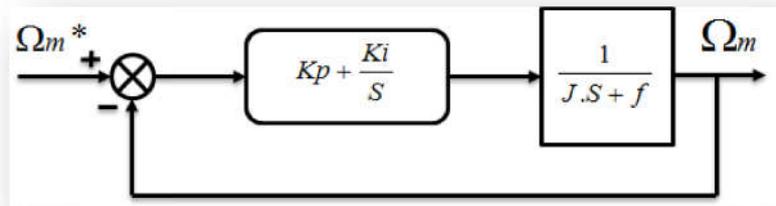
### A.1 Identification des régulateurs:

Les régulateur classique permet de contrôler la précision et la rapidité des systèmes asservis, ils sont le prisés dans l'industrie. Nous avons travaillé avec deux régulateur, Régulateur Proportionnelle-Intégral PI et régulateur Intégral-Proportionnelle IP.

### A.2 Régulateur de vitesse de la turbine:

#### A.2.1 Régulateur PI :

Notre système est corrigé par un régulateur de type proportionnel intégral (PI) dont la fonction de transfert est de la forme  $\left[ K_p + \frac{K_i}{S} \right]$ . La figure II.11 montre l'asservissement de la vitesse  $\Omega_{m-ref}$  en boucle fermé



**Figure A.1 : Système à régulé par PI**

La fonction de transfert en boucle ouverte est donnée par :

$$FTBO = \frac{K_p.S + K_i}{S} \cdot \frac{1}{J.S + f} \quad (A.1)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est donnée par la formule suivante :

$$FTBO = \frac{K_p.S + K_i}{S^2 + \frac{K_p + f}{J}.S + \frac{K_i}{J}} \quad (A. 2)$$

Sachant que la pulsation naturelle et le coefficient d'amortissement sont donnés par :

$$\omega_n^2 = \frac{K_i}{J} \Rightarrow \omega_n = \sqrt{\frac{K_i}{J}} \quad (A. 4)$$

Et :

$$\xi = \frac{K_p + f}{2.\omega_n.J} \quad (A. 5)$$

Donc les paramètres du régulateur deviennent alors :

$$K_p = 2.\xi.\omega_n.J - f \qquad K_i = J.\omega_n^2 \quad (A. 6)$$

## Annexe B

## B.1 Régulation de puissance :

Le schéma bloc de régulation de puissance active et réactive avec un régulateur PI représente par la figure B.1.

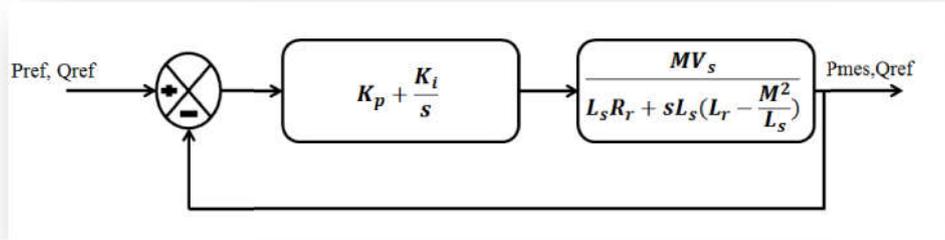


Figure B.1 : Schéma d'un Régulateur PI de puissance

La fonction de transfère en boucle ouvert est :

$$FTBO = \frac{MV_s(K_p s + K_i)}{s[L_s R_r + sL_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})]} \quad (B.1)$$

La fonction de transfère en boucle fermé est donner par:

$$FTBF = \frac{(K_p s + K_i)MV_s}{sL_s R_r + s^2 L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s}) + MV_s(K_p s + K_i)} \quad (B.2)$$

$$FTBF = \frac{(K_p s + K_i)MV_s}{s^2 L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s}) + s(L_s R_r + MV_s K_p) + MV_s K_i} \quad (B.3)$$

$$FTBF = \frac{\frac{(K_p s + K_i)MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{s^2 + \frac{s(L_s R_r + MV_s K_p)}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})} + \frac{MV_s K_i}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}} \quad (B.4)$$

On a l'équation :

$$FT = \frac{Kw_n^2}{s^2 + 2\varepsilon w_n s + w_n^2} \quad (B.5)$$

Par identification de l'équation (B.5) avec l'équation (B.4) on obtienne:

$$2\varepsilon w_n = \frac{(L_s R_r + M V_s K_p)}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \Rightarrow 2\varepsilon w_n \cdot L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) = (L_s R_r + M V_s K_p) \quad (B.6)$$

$$K_p = \frac{2\varepsilon w_n \cdot L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) - L_s R_r}{M V_s} \quad (B.7)$$

$$w_n^2 = \frac{M V_s K_i}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (B.8)$$

$$K_i = \frac{w_n^2 \cdot L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{M V_s} \quad (B.9)$$

## B.2 Régulation de vitesse :

Le régulateur de vitesse permet de déterminer couple de référence, afin de maintenir la vitesse correspondant. La dynamique de vitesse est donnée par l'équation mécanique suivant :

$$C_{em} - C_r = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f \cdot \Omega \Rightarrow C_{em} - C_r = J \cdot \Omega s + f \cdot \Omega$$

$$\Rightarrow C_{em} - C_r = (Js + f) \Omega$$

$$\Rightarrow \Omega = \frac{C_{em} - C_r}{(Js + f)} = \frac{C_{ref} - w}{(Js + f) p}$$

$$\frac{w}{C_{ref}} = \frac{p}{Js + f} \quad (B.10)$$

La régulation de vitesse avec régulateur PI est représentée par la figure B.2.

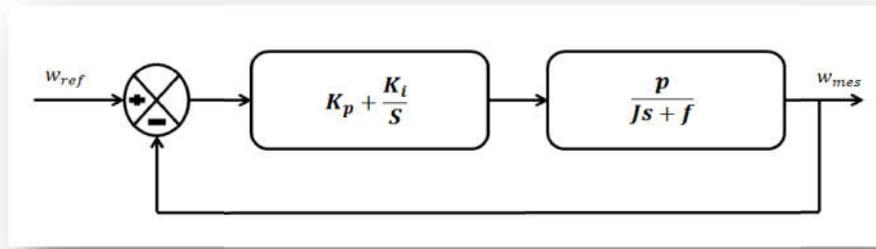


Figure B.2 : Schémas d'un régulateur PI de vitesse.

La fonction de transfère en boucle ouvert est :

$$FTBO = \frac{(sk_p + k_i)p}{s(JS + f)} \quad (B.11)$$

La fonction de transfère en boucle fermé est donnée par :

$$FTBF = \frac{(sk_p + k_i)p}{s(JS + f) + (sk_p + k_i)p} \quad (B.12)$$

$$FTBF = \frac{(sk_p + k_i)p}{Js^2 + s(f + pK_p) + k_i p} \quad (B.12)$$

$$FTBF = \frac{\frac{(sk_p + k_i)p}{J}}{s^2 + \frac{s(f + pK_p)}{J} + \frac{k_i p}{J}} \quad (B.13)$$

Par identification de l'équation B.5 avec l'équation B.13 nous obtenons :

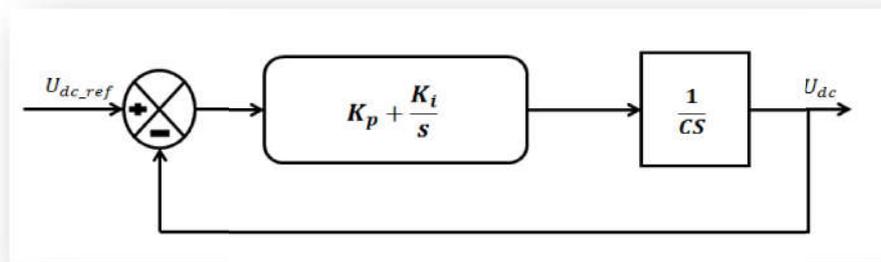
$$2\varepsilon w_n = \frac{(f + pK_p)}{J} \Rightarrow K_p = \frac{2\varepsilon w_n J - f}{p} \quad (B.14)$$

$$w_n^2 = \frac{k_i p}{J} \Rightarrow k_i = \frac{w_n^2 J}{p} \quad (B.15)$$

### B.3 Régulation de la tension du bus continue $U_{ds}$ :

La régulation des transites de puissance permet d'imposer le courant capacitif au bus continu. Le réglage du bus continu est alors réalisée au moyen d'une boucle de régulation, permet de maintenir une tension constante du bus continu, avec deux types de correcteur PI et IP générant la référence de la tension a injecté dans le condensateur C.

Il est à noter que le réglage du bus continu est donc réalisé par une boucle externe de régulation



**Figure. B.3 : Commande en boucle fermée de la tension Du bus continu avec régulateur PI**

La fonction de Transfert en boucle ouvert est comme suit :

$$FTBO = \frac{Kp.S + Ki}{C.S^2} \quad (B.16)$$

La fonction de Transfert en boucle fermé est comme suit :

$$T(S) = FTBF = \frac{Kp.S + Ki}{C.S^2 + Kp.S + Ki} \quad (B.17)$$

On divise le dénominateur et le numérateur de l'équation(III -) par C est en trouve:

$$T(S) = \frac{\left( \frac{Kp.S + Ki}{C} \right)}{S^2 + \frac{Kp}{C}.S + \frac{Ki}{C}} \quad (B.18)$$

Après identification du dénominateur de l'équation (B.5) avec celui de la fonction de transfert du second ordre utilisé précédemment, nous obtenons :

$$2.\xi.\omega_n = \frac{Kp}{C} \quad \omega_n^2 = \frac{Ki}{C}$$

Donc :

$$Kp = 2.\xi.\omega_n.C \quad Ki = \omega_n^2.C$$

