

1/621.727

République Algérienne Démocratique et Populaire  
 Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
 Université 8Mai 1945 – Guelma  
 Faculté des Sciences et de la Technologie  
 Département de Génie Electrotechnique et Automatique



**Domaine : Sciences et Technologie**  
**Filière : Génie Electrique**  
**Spécialité : Commande des machines électriques**

**Mémoire de fin d'études  
 pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

---

**COMMANDE OPTIMISÉE PAR UN ALGORITHME  
 GÉNÉTIQUE D'UNE GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE  
 À DOUBLE ALIMENTATION  
 APPLICATION À UN SYSTÈME EOLIEN  
 À VITESSE VARIABLE**

---

Présenté par :  
**ZAIDI HOUSSAM**  
**SALMA ABDELGHANI**

Sous la direction de :  
**MENDACI SOFIANE**



**JUIN 2012**

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université 8Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la Technologie

**Département de Génie Electrotechnique et Automatique**



**Domaine : Sciences et Technologie**  
**Filière : Génie Electrique**  
**Spécialité : Commande des machines électriques**

**Mémoire de fin d'études**  
**pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

---

**COMMANDE OPTIMISÉE PAR UN ALGORITHME  
GÉNÉTIQUE D'UNE GÉNÉRATRICE ASYNCHRONE  
À DOUBLE ALIMENTATION  
APPLICATION À UN SYSTÈME EOLIEN  
À VITESSE VARIABLE**

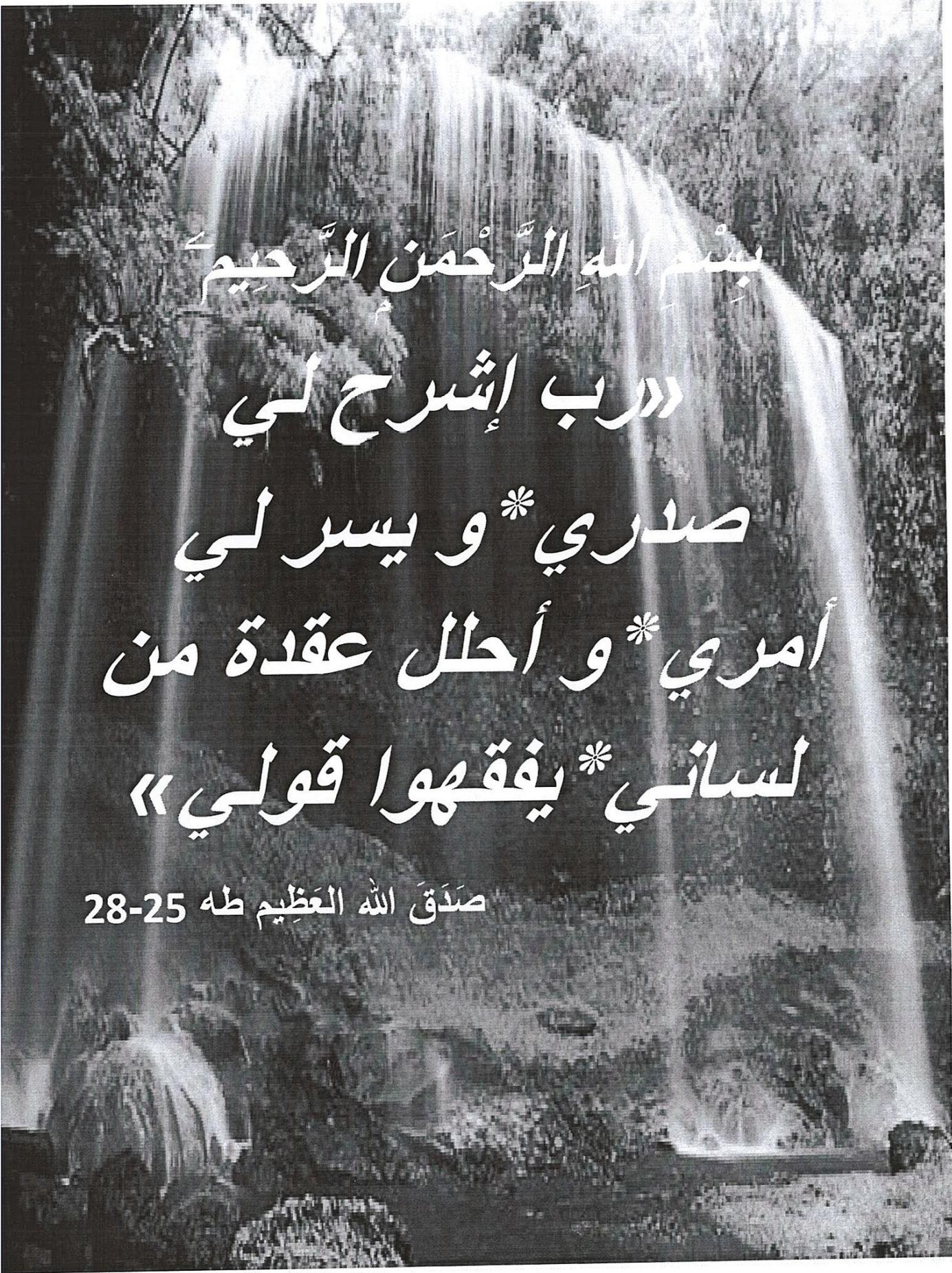
---

Présenté par :

**ZAIDI HOUSSAM**  
**SALMA ABDELGHANI**

Sous la direction de :  
**MENDACI SOFIANE**

JUIN 2012



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ  
«رب اشرح لي  
صدري\* و يسر لي  
أمري\* و أحل عقدة من  
لساني\* يفتحها قولي»

صَدَقَ اللَّهُ الْعَظِيمُ طه 25-28

## REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont tout d'abord, à **Dieu** tout puissant qui m'a donné la foi, le courage et la patience de parvenir à finir ce modeste travail.

J'adresse tout d'abord ma profonde reconnaissance à Monsieur **Mendaci Sofiene**, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de rapporter ce mémoire, et pour ses conseils et encouragements réguliers, ses qualités scientifiques et humaines ont toujours été une source de motivation.

Je tiens à remercier très profondément les membres de jury qui ont accepté de juger ce travail

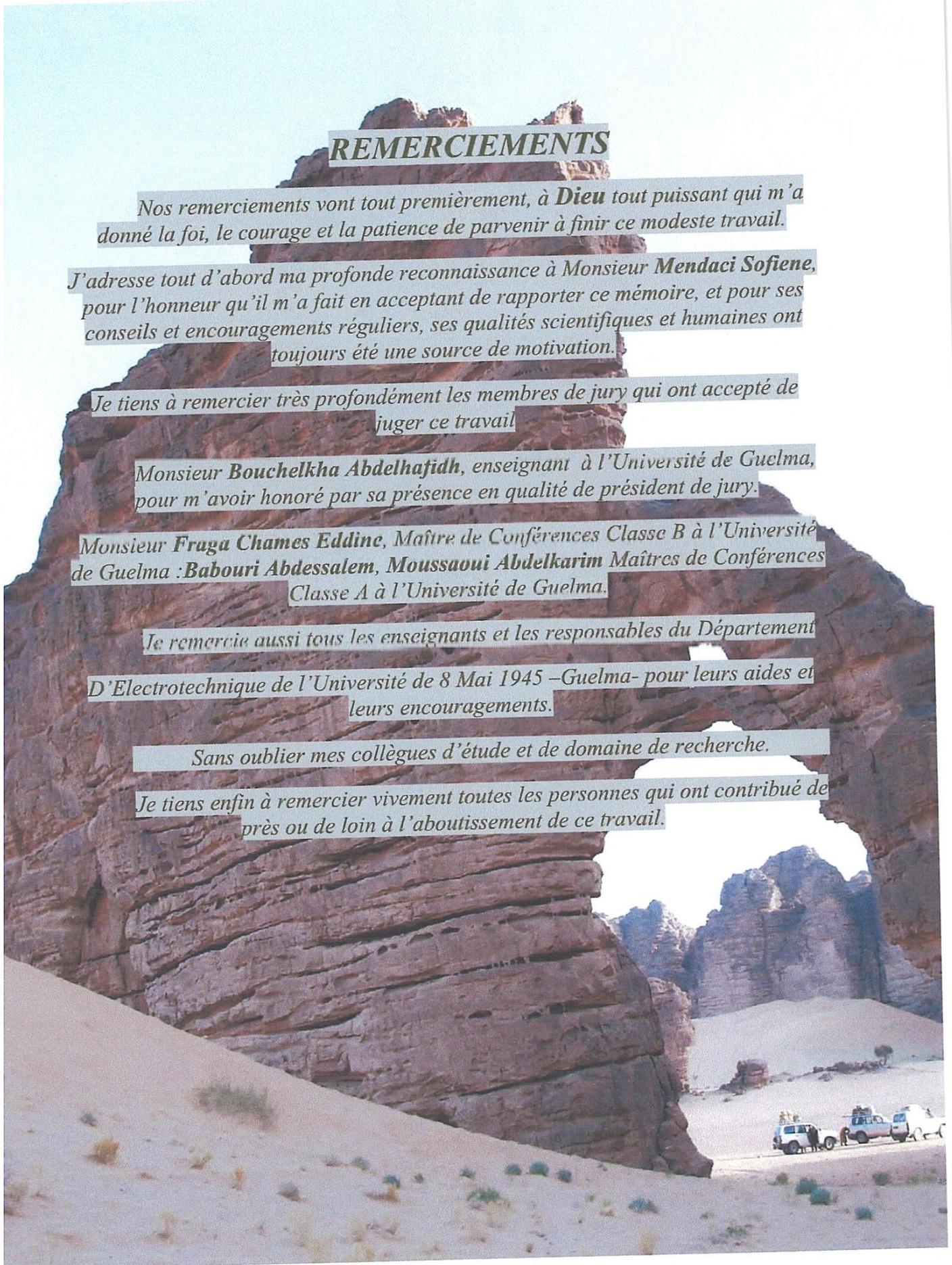
Monsieur **Bouchelkha Abdelhafidh**, enseignant à l'Université de Guelma, pour m'avoir honoré par sa présence en qualité de président de jury.

Monsieur **Fraga Chames Eddine**, Maître de Conférences Classe B à l'Université de Guelma : **Babouri Abdessalem**, **Moussaoui Abdelkarim** Maîtres de Conférences Classe A à l'Université de Guelma.

Je remercie aussi tous les enseignants et les responsables du Département D'Electrotechnique de l'Université de 8 Mai 1945 –Guelma- pour leurs aides et leurs encouragements.

Sans oublier mes collègues d'étude et de domaine de recherche.

Je tiens enfin à remercier vivement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.



*Dédicace:*

*Qu'il me soit permis d'exprimer ma profonde gratitude a mon feu père Abdellatif qui tenait à mon avenir sans avoir eu le temps de l'édifier*

*A mon adorable mère Haoua pour m'avoir lance le défi d'avoir un niveau d'instruction significative afin d'émerger du cercle d'un alphabétisme dans lequel elle vit, il histoire reteindre l'expression de son amour maternel et de son attachement à un idéal, intellectuel pour ses enfants.*

*A mon très cher frère qui est le plus beau cadeau Riad  
A mes très chères sœurs, je souhaite qu'Allah me protège.*

*Mes grands pères et mes grandes mères*

*A tous mes oncles et tantes*

*A tous mes camarades de promotion pour les joies et les peines que nous avons vécues ensembles des courages pour la suite*

**Houssam**

*Dédicace :*

*A ma mère*

*A la mémoire de mon père*

*A mes frères et mes sœurs*

*A tous ceux qui me sont chers*

*Je dédie ce modeste travail....*

*Salma Abdelghani.*



# Table de matières

## La Table de Matières

NOTATIONS ET SYMBOLIQUE.....	3
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	5

### CHAPITRE I

#### État de l'art des génératrices éoliennes

1. Introduction.....	8
2. L'Energie éolienne.....	8
2.1 L'historique de l'éolien.....	9
3. Différent type d'éoliennes.....	9
3.1 Les éoliennes à axes horizontal.....	10
3.2 Les éoliennes à axes vertical.....	10
4. Principe et les éléments constitutifs d'une éolienne.....	11
4.1 Les éléments constitutifs d'une éolienne.....	11
4.1 Principe et théorie d'une éolienne.....	14
4.2 La Technique d'une éolienne.....	14
5. Application des systèmes de conversion aérodynamique.....	14
5.1 Système isolée (autonome).....	15
5.2 Système connectée au réseau.....	15
5.3 Système hybride.....	15
6. Systèmes de génération d'électricité peuvent être rencontrés...	15
6.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone.....	15
6.2. Systèmes utilisant la machine synchrone.....	16
7. Utilisation de la MADA dans la conversion d'énergie éolienne..	16
7.1 Machine asynchrone à double alimentation.....	17
8. Avantage et inconvénients de l'énergie éolienne.....	18
8.1 Les inconvénients.....	19
8.2 Les Avantage.....	19
9. L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains.....	20
Conclusion .....	21

## CHAPITRE II

### Modélisation et Commande Vectorielle de la MADA

1. Introduction.....	23
2. Structure de la MADA.....	24
3. modélisation de la MADA dans le plan (abc).....	25
3.1. Equations électriques de la machine.....	25
3.2. Equations magnétiques de la machine.....	26
4. Modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le plan (dq).....	27
4.1 Transformation de Park.....	27
4.2 Relation entre les flux et les courants.....	28
4.3 Le choix du référentiel.....	29
4.4 Expressions du couple électromagnétique.....	30
4.5 mise sous forme d'équations d'état.....	32
5. Commande vectorielle de la MADA.....	33
5.1 Expressions des puissances actives et réactives.....	34
5.2 Réglage directe des puissances active et réactive de la MADA.....	37
Conclusion.....	40

## CHAPITRE III

### Synthèse optimale des régulateurs de puissances par algorithme génétique

1. Introduction.....	42
2. Présentation de l'algorithme génétique standard.....	42
2.1 Introduction sur les algorithmes génétiques.....	42
2.2 Principe des algorithmes génétiques.....	43
2.3 Structure de l'algorithme génétique.....	44
3. Application de l'algorithme génétique pour la synthèse des correcteurs.....	53
3.1 Détermination de l'objectif à optimiser.....	53
3.2 Résultats de simulation.....	55

**Conclusion.....59**  
**CONCLUSION GENERALE.....61**  
**Bibliographie.....63**  
**ANNEXE.....66**

## NOTATIONS ET SYMBOLIQUES

### Abréviations

**MADA, DFIM:** Machine asynchrone à double alimentation, doubly fed induction machine

**GADA, DFIG:** Génératrice asynchrone à double alimentation doubly fed induction generator

**AC/CC, AC/DC:** Alternative/Continue, Alternative/Direct

**PI:** Proportionnel intégral

### Indices

**a, b, c :** Repère triphasé (réel)

**r, s :** Stator et Rotor

**d, q :** Repère biphasé lié au champ tournant

**$\alpha$ ,  $\beta$ :** Repère biphasé lié au stator (fixe)

**n :** Valeur nominale

### Symboles

**g:** Glissement

**f:** Fréquence

**F.m.m :** Force magnétomotrice

**np:** Nombre de paires de pôles

**v:** Tension instantané

**i:** Courant instantané

**$\Phi_s$ :** Vecteur flux statorique

$\Phi_r$ : Vecteur flux rotorique

$\omega_m$ : Vitesse angulaire du rotor (rad/s)

$\omega_s$ : Pulsation des grandeurs statoriques

$\omega_r$ : Pulsation des grandeurs rotoriques

$\Theta$ : Position angulaire du rotor par rapport au repère fixe ( $\alpha, \beta$ )

$\Theta_s$ : Position angulaire du repère ( $d, q$ ) par rapport au repère fixe ( $\alpha, \beta$ )

$\Theta_r$ : Position angulaire du repère ( $d, q$ ) par rapport au repère lié au rotor

$R_s, R_r, R_m$ : Résistances statoriques, rotoriques et magnétiques

$L_s, L_r, L_m$ : Inductances statoriques, rotoriques et magnétiques

$I_s, I_r$ : Inductances de fuite statoriques et rotoriques

$P_m$ : Puissance mécanique d'entraînement

$P_s, Q_s$ : Puissance active et réactive du stator

$P_r, Q_r$ : Puissance active et réactive du rotor

$C_e$ : Couple électromagnétique

$K_i, T_i$ : Paramètre de du correcteur PI

# Introduction Générale

### 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 [1-9].

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.

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

C'est dans ce contexte général que vient s'inscrire notre étude qui porte sur l'une des énergies renouvelables en développement actuellement qui est l'énergie éolienne.

La littérature atteste du grand intérêt accordé aujourd'hui à la machine doublement alimentée (MADA) pour diverses applications: en tant que génératrice pour les énergies éoliennes ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime. Cet intérêt est dû essentiellement aux degrés de liberté qu'elle offre du fait de l'accessibilité de son rotor et donc de la possibilité de l'alimenter par un convertisseur aussi bien du côté du stator que du côté du rotor [1-4].

Le premier chapitre est un état de l'art des énergies éoliennes, dans le monde. Aussi une description sommaire des différents éléments d'un aérogénérateur et leur principe sera présentée, utilisation de la MADA dans la conversion d'énergie éolienne, avantage et inconvénients de l'énergie éolienne et l'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains ;

Le second chapitre est consacré, dans la première partie, à l'étude de la génératrice asynchrone à double alimentation. Cette dernière sera modélisée en se basant sur la transformation de PARK. Dans la deuxième partie de ce même chapitre, nous présenterons une technique de réglage découplé des puissances active et réactive de la MADA connectée directement au réseau et pilotée par les tensions de son rotor. Cette technique vectorielle est basée sur l'orientation du flux statorique suivant le repère de PARK, cela permet de découpler la commande des puissances active et réactive tout en réduisant la relation entre les puissances et les tensions rotoriques à un premier ordre très simple à manipuler ;

# Premier Chapitre

# **CHAPITRE I :**

## **État de l'art des génératrices éoliennes**

### **1. Introduction :**

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique; d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable.

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes [1].

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie cinétique du vent et les différents types de génératrice. [1-7].

La dernière partie de ce chapitre illustre les différentes structures des machines asynchrones à double alimentation [6], leur principe de fonctionnement, leurs applications et leur intérêt, et finalement nous avons fini ce chapitre avec les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne, et l'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains [6], [2].

### **2. L'Energie éolienne:**

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est directement lié à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps été oublié, cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, connaît depuis environ 30 ans un développement sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers [1-4].

## ➤ définition

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

### 2.1 L'historique de l'éolien

Dés l'aube de l'humanité, le vent a été exploité pour en extraire de l'énergie mécanique, en effet depuis 3000ans environ, il fût utilisé pour la propulsion des navires, pour les moulins à blé, ainsi que pour le pompage, Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait dans ce domaine conçu un projet d'irrigation à partir de la puissance du vent [2-3].

Les premiers moulins à vent firent leurs apparitions au milieu du XIXème siècle, utilisés tout d'abord pour moudre le grain d'où leurs noms de moulin, ils furent aussi utilisés aux pays bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés, il y avait alors environ 200 000 moulins à vent en Europe, et c'est l'arrivée des machines à vapeur qui fût la cause de leur déclin et de leur disparition progressive.

L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891, qui fut sans doute le pionnier dans ce domaine, d'associer une turbine éolienne à une génératrice.

Dés lors les recherches allèrent bon train, et les aérogénérateurs firent une apparition massive, avec près de 1million dans le monde vers les années 60.

La crise pétrolière de 1973, relança les études et les expériences cette fois ci à grande échelle.

Actuellement, l'éveil et la prise de conscience du danger du réchauffement climatique du aux gaz à effet de serre vont de nouveau relancer le recherche dans le domaine des énergies renouvelables en général et de l'énergie éolienne en particulier.

### 3. Différent type d'éoliennes

Le vent a toujours excité l'imagination de l'inventeur qui a enfanté sur le papier une foule de projets éoliens.

Les éoliennes se rangent en deux grandes familles, selon qu'elles tournent autour d'un axe horizontal ou vertical.

### 3.1 Les éoliennes à axes horizontal

Sont le plus connues car elles comprennent la quasi-totalité principalement en détail sur ces deux types d'appareils aux performances très différentes.

- le multiple est une machine adapté aux ventes faibles et au pompage.
- l'hélice d'aérogénérateur tourne beaucoup plus vite ce qui est un avantage l'orque il s'agit d'animer une génératrice, fournit du courant même par vents très forts, atteints les meilleurs rendements aérodynamiques de l'ordre de 80%).

### 3.2 Les éoliennes à axes vertical

Le caractère omni directionnel des éoliennes modernes à axe vertical constitue leur principal avantage sur capter le vent, quelle que soit sa direction.

Cette caractéristique permet d'obtenir des systèmes simples et d'éliminer le problème des forces gyroscopiques sur le rotor d'un éliminer classique l'orsque celle-ci s'oriente en fonction du vent. L'axe verticale de rotation permet également d'installer le générateur et transissions sur niveau du sol.

Ce type d'éoliennes est très peu répandu et assez mal connue. Elles peuvent avoir un intérêt dans certains secteurs d'application. Il existe principalement trois technologies VAWT (Vertical Axis Wind turbine) : les turbines Darrius classique ou à pales droites (H-type) et la turbine de type Savonius, comme montré à la figure (2.10), toutes ces voilures sont à deux ou plusieurs pales [6].

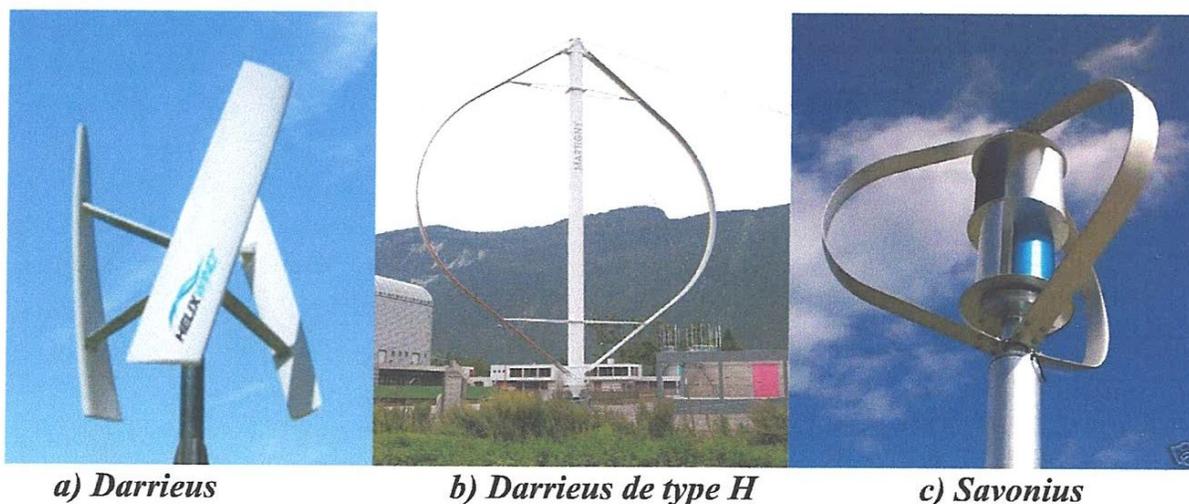


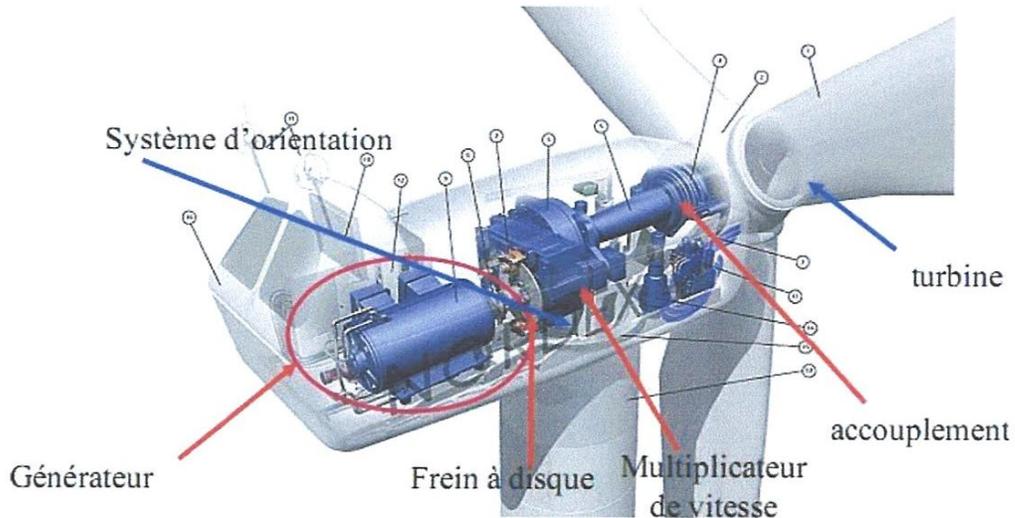
Figure I-4 différents type des éoliennes

## 4. Principe et les éléments constitutifs d'une éolienne:

### 4.1 Les éléments constitutifs d'une éolienne

Une éolienne classique est généralement constituée de trois éléments principaux, figure I-1 :

- **Le mât** : Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique. Il doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol.
- **La nacelle** : qui regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique tel que l'arbre lent et rapide les roulements, le multiplicateur, le générateur et les systèmes d'orientation des pales et de la nacelle. Pour capter au mieux l'énergie du vent, un calculateur est intégré dans la nacelle, afin d'orienter l'hélice perpendiculairement à la direction du vent. Les signaux émis par l'anémomètre (appareille qui mesure la vitesse du vent) sont transmis au système de contrôle-commande de l'éolienne pour démarrer celle-ci si la vitesse du vent atteint 5m/s ou de l'arrêter si le vent dépasse 25m/s. Pour le système d'orientation de la nacelle, une girouette placée sur la nacelle indique le sens du vent, les signaux transmis à l'ordinateur permettent de commander le système d'orientation de la nacelle face au vent. Le système de refroidissement comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur. L'arbre lent relie le moyeu au multiplicateur et est muni d'un système de freinage hydraulique en cas de besoin. La vitesse de rotation de l'hélice est de 12 à 15 tr/min ce qui n'est pas suffisant à un alternateur pour fonctionner correctement, un multiplicateur est donc placé juste avant l'alternateur pour augmenter la vitesse de rotation à environ 1500 tr/min. Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique actionné en cas d'urgence.
- **Le rotor** : formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit .



*Figure I-1 Chaîne de conversion d'une éolienne [1]*

#### 4.1 Principe et théorie d'une éolienne

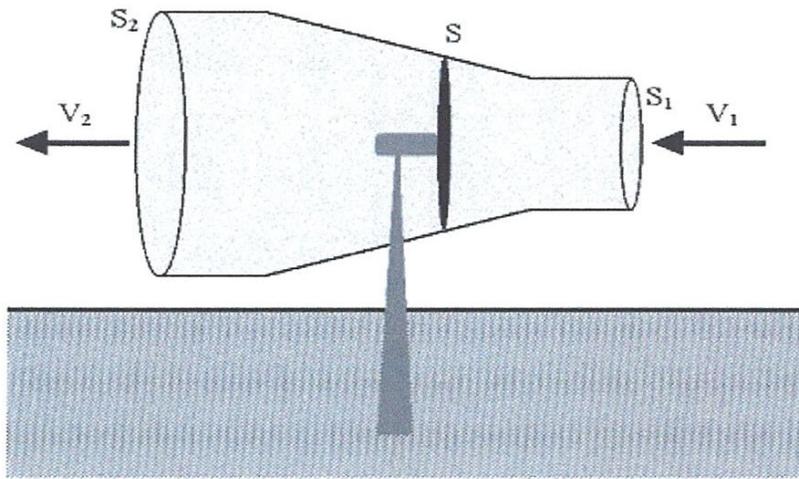
Le vent est caractérisé par trois grandeurs variables pendant le temps [3-7] :

Sa *direction* sa *vitesse* et son *intensité*.

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent, elle est fonction de la masse et de la vitesse du volume d'air. Dans l'hypothèse que la masse volumique de l'air est constante on peut dire que :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (\text{I.1})$$

Considérons le système à axe horizontal où  $v_1$  et  $v_2$  sont la vitesse du vent en amont et en aval de l'aérogénérateur, or la vitesse du vent qui traverse le rotor est égale à la moyenne de ces deux vitesses.



*Figure I-2 courant d'air autour d'un aérogénérateur*

Dans ce cas, la masse d'air en mouvement en une seconde est :

$$m = \frac{\rho S(v_1 + v_2)}{2} \quad (I.2)$$

La puissance extraite est donnée par la deuxième loi de Newton :

$$P_m = \frac{m(v_1^2 - v_2^2)}{2} \quad (I.3)$$

En utilisant (I.3), on trouve :

$$P_m = \frac{\rho S(v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)}{4} \quad (I.4)$$

Pour un vent supposé non perturbé, traversant une surface  $S$  à une vitesse  $v_1$ , pendant une unité de temps (1 seconde), on obtient une puissance théorique égale à :

$$P_{mt} = \frac{\rho S v_1^3}{2} \quad (I.5)$$

Où  $\rho$  est la masse volumique de l'air.

$S$  représente la surface des pales balayée par la masse d'air en mouvement.

Cependant, le dispositif de conversion extrait une puissance  $P_m$  inférieure à la puissance théoriquement récupérable à cause de la vitesse non nulle des masses d'air en amont de la turbine, le coefficient de puissance de l'aérogénérateur est défini par :

$$C_p = \frac{P_m}{P_{mt}} \quad (I.6)$$

Donc, on aura :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \frac{v_1}{v_2}\right) \left(1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^2\right)}{2} \quad (I.7)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus on remarque que ce ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance théorique présente une limite théorique appelée limite de Betz égale à 16 /27 soit 0,59.

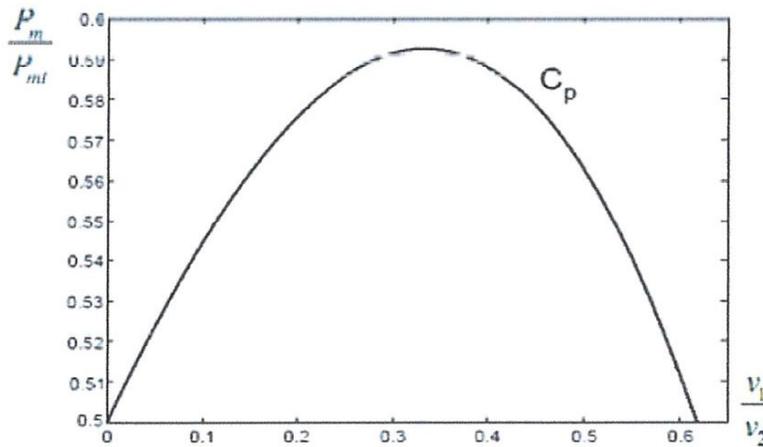


Figure I-3 Coefficient de puissance

## 4.2 La Technique d'une éolienne

Une éolienne, accouplée à un générateur électrique ou à une dynamo, fabrique du courant continu qui peut soit alimenter des batteries, soit être relié au secteur (courant alternatif obtenu grâce à un onduleur) .on la nomme alors aérogénératrice.

Pour comprendre comment marche une éolienne, il faut connaître ses caractéristiques mécaniques, électrotechniques et aérodynamiques [2], [6].

## 5. Application des systèmes de conversion aérodynamique

Dans la littérature, il existe deux catégories d'éoliennes telles que les éoliennes isolées (autonomes), les éoliennes connectées au réseau et les éoliennes hybrides.

### **5.1 Système isolée (autonome) :**

Les éoliennes autonomes sont utilisées dans des gammes de puissances de quelques dizaines de Watts à quelques dizaines de kW pour l'alimentation d'appareils électriques d'instrumentation ou d'éclairage. Les plus petites éoliennes sont utilisées pour les bateaux, le camping ou les stations météo. Les éoliennes de plus grande puissance sont utilisées pour la production destinée à alimenter en énergie électrique des villages isolés [4].

Les points communs entre toutes ces éoliennes sont leur faible puissance et leur association à une unité de stockage d'énergie, généralement constituée de batteries d'accumulateurs [4].

### **5.2 Système connectée au réseau :**

Les systèmes liés au réseau n'ont pas besoin de systèmes de stockage d'énergie ; par conséquent, toute la génération est livrée directement au réseau électrique.

### **5.3 Système hybride :**

Les systèmes hybrides sont ceux qui présentent plus d'une source d'énergie comme, par exemple, turbines éoliennes, génératrices Diesel, modules photovoltaïques, entre eux.

L'utilisation de plusieurs formes de génération d'énergie électrique augmente la complexité du système et exige l'optimisation de l'utilisation de chacune des sources.

## **6. Systèmes de génération d'électricité peuvent être rencontrés**

A travers la littérature spécialisée nous avons rencontré plusieurs types de génératrices adaptées aux éoliennes. Les deux types les plus utilisés sont cités ci-dessous:

### **6.1. Systèmes utilisant la machine asynchrone**

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé.

La constitution du stator est la même que pour la machine synchrone et le rotor comporte soit un système d'enroulements triphasés (si le stator est triphasé é lui aussi) ou une cage d'écureuil en court circuit

Les configurations illustrées sur les différentes figures représentent les topologies les plus courantes rencontrées dans les aérogénérateurs et faisant intervenir les deux types de machines dont on a décrit les caractéristiques principales.

Le terme « Convertisseur » apparaissant dans ces figures se réfère à différents types de composants d'électronique de puissance [6].

## **6.2. Systèmes utilisant la machine synchrone**

Ce type de machine est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille. De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplées. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance [6].

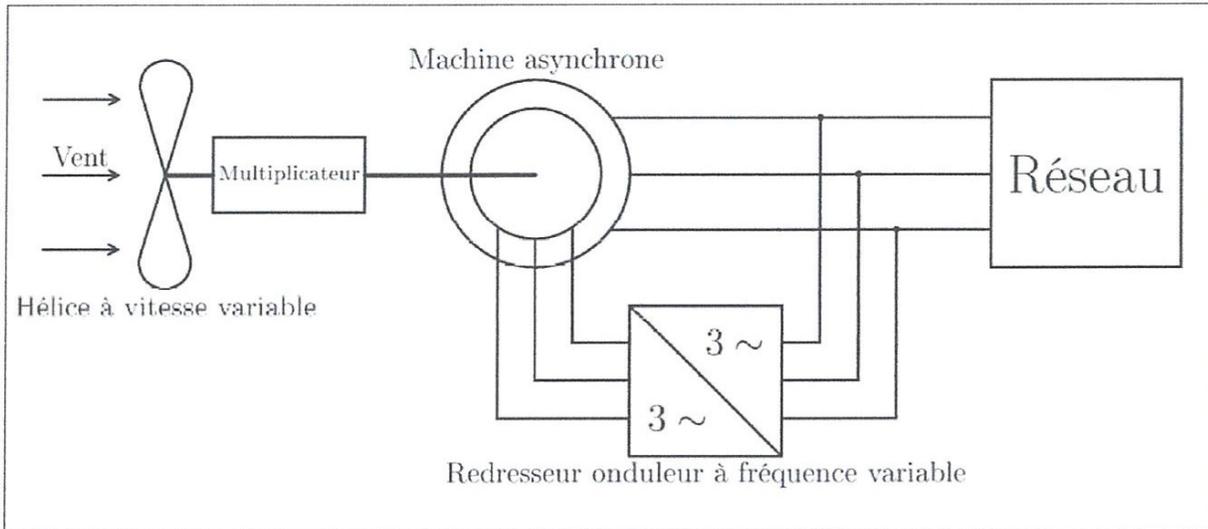
## **7. Utilisation de la MADA dans la conversion d'énergie éolienne**

Contrairement aux machines asynchrones à cage ou aux machines synchrones qui sont contraintes à fonctionner à la vitesse du synchronisme ou dans son voisinage, la MADA est une machine dont la vitesse de fonctionnement est située sur une grande plage de variation.

Par cette caractéristique intéressante, la MADA connaît un succès grandissant dans le domaine de la conversion électromécanique [7-8].

### 7.1 Machine asynchrone à double alimentation

Pour cette machine, le rotor est bobiné et comporte des enroulements triphasés couplés en étoile associés à des bagues collectrices qui permettent d'alimenter ses enroulement le stator est indiqe à celui d'une machine asynchrone



à cage.

*Figure I.4- schéma de principe de la double alimentation [4]*

On connecte toujours le stator au réseau mais ici au lieu de court-circuiter les enroulements rotorique, on les alimente en alternatif à fréquence variable à partir de réseau via un onduleur des taille réduite. La puissance à fournir au rotor est faible devant la puissance produite par le stator.

De cette manière, il est possible de produire de l'énergie avec des vitesses de rotation d'un rotor variant dans une large plage. En effet, la fréquence des tentions de sortie d'une machine asynchrone dépend de ca vitesse de rotation et donc du glissement  $g$  ;

$$g = 100 \cdot \frac{\Omega_{synchronisme} - \Omega_{rotor}}{\Omega_{synchronisme}} \quad (I.8)$$

Avec

$\Omega$  : Pulsation mécanique

Comme la fréquence des courant rotorique dépend du glissement :

$$\omega_{rotor} = g \cdot \omega_{synchronisme} \quad (I.9)$$

Avec

$$\omega_{synchronisme} = \frac{\Omega_{synchronisme}}{p} \quad (I.10)$$

Avec  $\omega_{synchronisme}$  pulsation électrique et  $P$  nombre de paires de pôles de la machine.

On peut ainsi obtenir une fréquence de sortie de 50Hz ( $\omega_{synchronisme} = 100\pi$ ) quelle soit la vitesse de rotation de l'éolienne à condition d'injecter au rotor des tensions à une fréquence qui compense cette différence de vitesse.

$$\omega_{rotor} = \frac{\Omega_{synchronisme} - \Omega_{rotor}}{p} = 100\pi - \frac{\Omega_{rotor}}{p} \quad (I.11)$$

Il faut réguler l'amplitude des tensions rotoriques pour contrôler la production d'énergie. On obtient une éolienne plus complexe que précédemment mais qui permet de mieux capter le vent car la production s'effectue quelle que soit la vitesse du vent avec une puissance variable. De plus, si l'on installe une hélice à pas variable pour capter les faibles vents et limiter la vitesse en cas de fort vent, on aboutit à un système très performant. Il est aussi envisageable de concevoir une telle machine avec un grand nombre de pôles pour une liaison mécanique directe à l'hélice.

L'inconvénient de cette machine est la présence de bagues collectrices pour alimenter du rotor. Ces contacts s'usent et demandent donc de l'entretien. Pour remédier à ce problème, des machines asynchrones à double stator sont à l'étude pour des fonctionnements en MADA brushless. On envisage même l'utilisation de deux machines sur le même arbre, l'une servant à la production électrique et l'autre alimentation des enroulements rotoriques.

Ce type d'aérogénérateur s'est développé récemment car la double alimentation de machine asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne. Avec un onduleur de taille réduite et une commande appropriée, on obtient une qualité de tension similaire à celle de la machine asynchrone classique [4].

## 8. Avantage et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie.

Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produit que n'implore quelle source d'énergie traditionnelle [2].

## 8.1 Les inconvénients

Même s'il s ne sont pas nombreux, l'éolienne a quelques désavantages :

- L'impact visuel ca reste nécrosest diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès au niveau du multiplicateur .le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée ;
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux ci ne se fassent pas attraper par les aéro turbines ;
- La qualité de la puissance électrique: la source d'énergie éolienne étant stochastique, la qualité de la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constant .la qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes ;
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puis sur les meilleurs sites, c'est-à-dire là ou il ya le plus de vent, concurrence la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés [2].

## 8.2 Les Avantages

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :
- L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO<sub>2</sub> ;
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier ;
- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles ;

- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie;
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermique et des centrales nucléaires [2].

### **9. L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains**

- C'est une source d'énergie locale qui répond au besoin locaux en énergie ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère entre l'énergie renouvelable.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement .elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer.

L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.

- Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.

Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà

L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle [6].

**Conclusion :**

L'énergie électrique est l'énergie la plus importante et la plus noble parmi toutes les autres formes d'énergies. Ainsi la proportion électrique par rapport à l'énergie totale consommée, ne cesse pas de croître, il faudrait pour cela pouvoir développer suffisamment les énergies renouvelables pour pouvoir diminuer la consommation absolue (et non relative) d'énergie fossiles; les énergies renouvelables sont aussi parfois présentées comme une solution au problème de l'environnement.

Dans ce chapitre nous avons mentionné que les énergies renouvelables peuvent être issues de ressource hydraulique, solaire, géothermie, biomasse et éolienne, et nous avons analysé la technique d'une éolienne avec les applications, les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.

# Deuxième Chapitre

## **CHAPITRE II :**

### **Modélisation et Commande Vectorielle de la MADA**

#### **1. Introduction :**

Pour assurer un réglage optimal des puissances débitées par une GADA dans un système éolien, une modélisation de la MADA est donc indispensable pour mettre en place une commande adéquate et performante.

En revanche, la commande de la machine à induction est difficile. Cette difficulté vient du fait que dans cette machine le couple électromagnétique résulte de l'interaction entre les courants du stator et les courants du rotor.

Pour obtenir un contrôle dynamique performant du couple, il faut, par un système de commande extérieur à la machine, réaliser un découplage des grandeurs du couple et du flux [2],[3], [4].

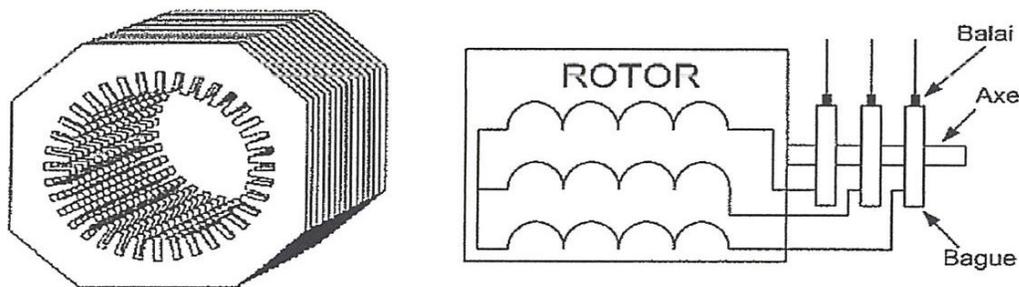
Ce découplage des armatures statorique et rotorique de la machine est réalisé en lui appliquant la théorie de la commande par flux orienté, théorie dite de commande vectorielle. Cette dernière a été proposée en 1971 par Blashke. Elle consiste à séparer la commande du flux de celle du couple en orientant le flux selon l'axe direct du repère choisi. Cette méthode fait deux choix, le premier concerne les variables d'états, le second le choix du repère. Cela permet d'avoir une structure de commande découplée.

Ce chapitre sera consacré dans une première partie à la description de la structure et du fonctionnement de la MADA. Puis une modélisation dans le référentiel de Park sera présentée.

Dans la deuxième partie, un principe de commande vectoriel des puissances actives et réactives par orientation du flux statorique sera discuté.

## 2. Structure de la MADA :

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches, mais il est constitué de trois bobines en étoile et dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne, figure II-1.



*Figure II.1. Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.*

En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné est de pouvoir modifier les caractéristique du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant lors du démarrage, augmenter le couple durant cette phase ; ainsi que de pouvoir élargir la plage de variation la de la vitesse [2-4].

La machine asynchrone à double alimentation est aussi couramment appelée «machine généralisée» , car sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent, mais il est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. Ce fonctionnement peut être, éventuellement, résumé par le terme de : machine asynchrone à excitation alternative.

### 3. modélisation de la MADA dans le plan (abc) :

A cause de la répartition des enroulements de la MADA et la géométrie propre complexe et afin de faciliter la modélisation, on prend quelques hypothèses, avancées habituellement, pour modéliser les machines électriques en vu de leur commande en général [2-3], [5-7] :

1. La machine est symétrique et à entrefer constant.
2. Le circuit magnétique n'est pas saturé et parfaitement feuilleté ; il en résulte que les pertes fer et par hystérésis sont négligeables et que seuls les enroulements sont parcourus par des courants.
3. La f.m.m créée dans une phase au stator et au rotor, est à répartition sinusoïdale le long de l'entrefer.
4. L'influence de l'effet de la température n'est pas prise en compte, il en résulte que tous les coefficients d'inductances propres sont constants et les coefficients d'inductances mutuelles sont fonction de la position de leurs axes magnétique.

#### 3.1. Equations électriques de la machine

En tenant compte des hypothèses ci-dessus, le modèle de la MADA comporte : Trois équations statorique et trois équations rotoriques comme le montre le système matriciel suivant :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\phi_s] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\phi_r] \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}, \quad [V_r] = \begin{bmatrix} v_{ar} \\ v_{br} \\ v_{cr} \end{bmatrix}, \quad [I_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}, \quad [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Où  $R_s$  et  $R_r$  sont respectivement les Résistances statoriques et rotoriques.

### 3.2. Equations magnétiques de la machine

Les équations des flux statoriques et rotoriques s'écrivent :

$$\begin{cases} [\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [M_{sr}] [I_r] \\ [\Phi_r] = [L_{rr}] \cdot [I_r] + [M_{rs}] [I_s] \end{cases} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ l_r & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix}; [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix}$$

Où  $l_s, l_r$  sont respectivement les inductances propres statorique et rotorique.

$M_s, M_r$  sont respectivement les inductances mutuelles statoriques et rotoriques.

La matrice des inductances mutuelles (ou la matrice de couplage rotor-stator) est donnée par :

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

En remplaçant (II.2) dans (II.1), on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} ([L_{ss}] \cdot [I_s]) + \frac{d}{dt} ([M_{sr}] \cdot [I_r]) \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} ([L_{rr}] \cdot [I_r]) + \frac{d}{dt} ([M_{rs}] \cdot [I_s]) \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Cette mise en équation aboutit à des équations différentielles à coefficients variables. L'étude analytique du comportement du système est alors

relativement laborieuse, vu le grand nombre de variables. On utilise alors des transformations mathématiques qui permettent de décrire le comportement de la machine à l'aide d'équations différentielles à coefficients constants.

Les transformations utilisées doivent conserver la puissance instantanée et la réciprocité des inductances mutuelles. Ceci permet d'établir une expression du couple électromagnétique dans le repère correspondant au système transformé et qui reste valable pour la machine réelle. Parmi les transformations utilisées, on cite celle de R.H.Park, [2-9].

#### 4. Modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le plan (dq)

##### 4.1 Transformation de Park :

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée – biphasée fixe, suivie d'une rotation. En effet, elle permet de passer du repère (abc) vers le repère ( $\alpha\beta$ ), puis vers le repère (dq). Le repère ( $\alpha\beta$ ) est toujours fixe par rapport au repère (abc) ; par contre le repère (dq) est mobile ; il forme avec le repère fixe ( $\alpha\beta$ ) un angle, appelé angle de la transformation de Park ou angle de Park [4].

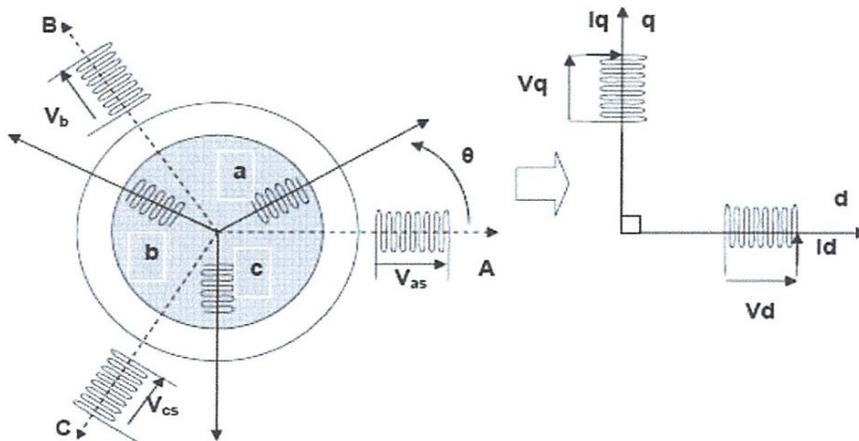


Figure II.2. Passage du triphasé au biphasé.

Ainsi, la transformation de Park permet de transformer les enroulements statoriques et rotoriques triphasés en deux enroulements statoriques et rotoriques biphasés orthogonaux, afin d'obtenir un modèle mathématique plus simple que le modèle physique du système précédent. La matrice de transformation de Park est définie comme suit :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Cette matrice permet le passage des composantes  $X_{abc}$  du système triphasé aux composantes biphasées  $X_{dq}$  ; avec  $X_{abc}$  peut être : un vecteur tension, courant ou flux.

Ainsi, les grandeurs statoriques et rotoriques sont transformées comme suit :

➤ Tensions :

$$\begin{cases} [V_{sdq}] = [P(\theta_s)] \cdot [V_{sabc}] \\ [V_{rdq}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [V_{rABC}] \end{cases}$$

➤ Courants :

$$\begin{cases} [I_{sdq}] = [P(\theta_s)] \cdot [I_{sabc}] \\ [I_{rdq}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [I_{rABC}] \end{cases}$$

➤ Flux :

$$\begin{cases} [\varphi_{sdq}] = [P(\theta_s)] \cdot [\varphi_{sabc}] \\ [\varphi_{rdq}] = [P(\theta_s - \theta)] \cdot [\varphi_{rABC}] \end{cases}$$

Notons que  $\theta$  représente le déphasage entre le stator et le rotor.

#### 4.2 Relation entre les flux et les courants:

L'application de la transformation de Park sur la relation entre les flux et les courants, donnée par l'équation (II.2), donne le système linéaire suivant :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + M \cdot I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_s I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$L_s = I_s - M_s$  : Inductance cyclique statorique.

$L_r = I_r - M_r$  : Inductance cyclique rotorique.

$M = \frac{3}{2} M_{sr} = \frac{3}{2} M_{rs}$  : Mutuelle cyclique entre stator et rotor.

Les équations des tentions statoriques et rotoriques, écrites dans le repère de Park, sont données par les systèmes ci-dessous :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_s \cdot \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_s \cdot \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} + (\omega_s - \omega) \cdot \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$ , est la vitesse du champ tournant.

$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$ , est la vitesse du rotor.

$\theta_s = \theta + \theta_r$  L'équation d'autopilotage.

### 4.3 Le choix du référentiel

Cependant, nous pouvons simplifier les équations (II.7) et (II.8) en choisissant un référentiel particulier pour dq. En effet, deux autres repères peuvent être choisis en plus le repère lié au champ tournant présenté précédemment. Le modèle de la MADA pour ces repères est présenté dans les paragraphes suivants.

• **Référentiel lié au stator :**

Caractérisé par  $\theta_s=0$ , et par conséquence, le système d'équations en tensions devient alors :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} + \omega \cdot \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} - \omega \cdot \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

• **Référentiel lié au rotor :**

Caractérisé par  $\theta_s = \theta_r$ , et par conséquence, le système devient alors :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d}{dt} \varphi_{ds} - \omega_r \cdot \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d}{dt} \varphi_{qs} + \omega_r \cdot \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \frac{d}{dt} \varphi_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.12})$$

**Remarque :**

- Les relations linéaires entre les flux et les courants données par le système (II.6) ne changent pas quelque soit le repère de Park choisi.
- Le repère lié au stator est souvent utilisé pour les simulations, l'étude des observateurs et les commandes directes du couple.
- Le repère lié au champ tournant est utilisé pour la commande vectorielle à flux orienté.

**4.4 Expressions du couple électromagnétique :**

La détermination du couple instantané dans une machine peut être effectuée de deux manières :

- Par un bilan de puissance instantanée.
- Par la méthode dite "des travaux virtuels".

Nous allons utiliser la première méthode pour notre cas puisque elle est plus simple.

La puissance électrique instantanée fournie aux enroulements statoriques et rotoriques en fonction des grandeurs d'axes d, q est donnée par l'expression suivante:

$$P_e = V_{ds}I_{ds} + V_{qs}I_{qs} + V_{dr}I_{dr} + V_{qr}I_{qr} \quad (\text{II.13})$$

En développant cette dernière expression, nous trouvons que la puissance instantanée se décompose en trois termes : puissance dissipée en pertes Joule, puissance représentant les échanges d'énergie électromagnétique avec la source, et puissance mécanique :

$$P_e = P_j + P_{em} + P_{mec} \quad (\text{II.14})$$

Où :

$$P_j = R_s(I_{ds}^2 + I_{qs}^2) + R_r(I_{dr}^2 + I_{qr}^2) \quad (\text{II.15})$$

$$P_{em} = I_{ds} \frac{d\Phi_{ds}}{dt} + I_{qs} \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + I_{dr} \frac{d\Phi_{dr}}{dt} + I_{qr} \frac{d\Phi_{qr}}{dt} \quad (\text{II.16})$$

$$P_{mec} = \omega(I_{dr}\Phi_{qr} - I_{qr}\Phi_{dr}) \quad (\text{II.17})$$

Or la puissance mécanique est reliée au couple électromagnétique par l'expression suivante :

$$C_e = \frac{P_{mec}}{\Omega} = P \frac{P_{mec}}{\omega} \quad (\text{II.18})$$

En tenant compte des expressions des flux (II.6) et des équations (II.17) et (II.18), nous pouvons avoir plusieurs expressions du couple électromagnétique toutes égales :

$$\begin{cases} C_e = P(\Phi_{qr}I_{qr} - \Phi_{dr}I_{qr}) \\ C_e = P(\Phi_{ds}I_{qs} - \Phi_{qs}I_{ds}) \\ C_e = PM(I_{dr}I_{qs} - I_{ds}I_{qr}) \\ C_e = P\frac{M}{L_r}(\Phi_{dr}I_{qs} - \Phi_{dr}I_{ds}) \\ C_e = P\frac{M}{L_r}(\varphi_{qs}\cdot I_{dr} - \varphi_{ds}\cdot I_{qr}) \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

#### 4.5 mise sous forme d'équations d'état

On peut mettre le système d'équations en tensions sous forme d'un système d'équations d'état par l'équation générale suivante :

$$\begin{cases} \dot{X} = A.X + B.U \\ Y = C.X + D.U \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

X : vecteur d'état

U : vecteur d'entrée

Y : vecteur de sortie

Le choix du vecteur d'état X se fait de plusieurs façons. Dans le cas de la MADA modélisée en vue de la commander par les tensions rotoriques, nous avons choisi :

$X = (\varphi_{ds}, \varphi_{qs}, I_{dr}, I_{qr}, \Omega_r)^t$ , et les grandeurs  $V_{dr}$  et  $V_{qr}$  comme des variables de commande. Après transformations des flux et courants, on aboutit au système (II.21) :

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \cdot \varphi_{ds} + \omega_s \cdot \varphi_{qs} + \alpha_s \cdot M \cdot I_{dr} + V_{ds} \\ \frac{d\varphi_{qs}}{dt} = -\alpha_s \cdot \varphi_{qs} + \omega_s \cdot \varphi_{ds} + \alpha_s \cdot M \cdot I_{qr} + V_{qs} \\ \frac{dI_{dr}}{dt} = -\gamma_r \cdot I_{dr} + (\omega_s - \omega_r) \cdot I_{qr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \varphi_{qs} - \beta \cdot V_{ds} + \frac{1}{\sigma_r} V_{dr} \\ \frac{dI_{qr}}{dt} = -\gamma_r \cdot I_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \cdot I_{dr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \varphi_{ds} - \beta \cdot V_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} V_{qr} \\ \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{P \cdot M}{J \cdot L_r} (\varphi_{qs} \cdot I_{dr} - \varphi_{ds} \cdot I_{qr}) - \frac{1}{J} C_r - \frac{K_f}{J} \Omega_r \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

On rappelle que :

$$\begin{cases} \alpha_s = \frac{R_s}{L_s} \\ \sigma_r = L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right) \\ \gamma_r = \left(\frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s M^2}{\sigma_r L_s^2}\right) \\ \beta = \frac{M}{\sigma_r L_s} \end{cases}$$

Notons aussi que :

$K_f$ : représente le coefficient de frottements visqueux.

$J$ : représente le moment d'inertie.

$C_r$ : est le couple de charge

$\Omega_r$ : vitesse du rotor mécanique.

## 5. Commande vectorielle de la MADA

La commande vectorielle est l'une des méthodes de commande appliquée aux machines électriques. Elle nous permet d'établir un mode de fonctionnement découplé en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. En effet, elle nous permet d'assimiler le comportement d'une machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu, où le couple électromagnétique est proportionnel au courant d'induit.

Pour le cas de la génération de l'énergie électrique avec un aérogénérateur utilisant une MADA, le contrôle découplé des puissances actives et réactives par orientation du flux statorique est très utilisé. En effet, cette orientation permet un contrôle facile des puissances par les courants et par conséquent par les tensions rotoriques [2-4].

### 5.1 Expressions des puissances actives et réactives

Les puissances active et réactive au niveau du stator s'écrivent de la manière suivante [4]:

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} \cdot I_{ds} + V_{qs} \cdot I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} \cdot I_{ds} - V_{ds} \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Si on suppose le réseau électrique stable, ayant pour tension simple  $V_s$ , cela conduit à un flux statorique constant. Donc sa dérivée dans le plan de Park est nulle.

Aussi, l'orientation du repère  $dq$  suivant le flux statorique, conduit aux équations suivantes :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = \varphi_s \\ \varphi_{qs} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

D'autre part, si on néglige la résistance des enroulements statoriques, et en prenant en compte les remarques précédentes, les équations des tensions statoriques se réduisent à:

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = V_s = \omega_s \cdot \varphi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Dans ces conditions aussi, l'expression des flux devient :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ 0 = L_s I_{qs} + M \cdot I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

A partir de l'équation précédente, on peut rétablir le lien entre les courants statoriques et rotoriques, équation (II.26)

$$\begin{cases} I_{ds} = \frac{\left(\frac{V_s}{\omega_s} - M \cdot I_{dr}\right)}{L_s} \\ I_{qs} = -\frac{M \cdot I_{qr}}{L_s} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

En tenant compte de l'expression (II.26) et de (II.24) dans l'équation des puissances (II.22), on trouve:

$$\begin{cases} P_s = -\frac{M}{L_s} V_s I_{qr} \\ Q_s = -\frac{M}{L_s} V_s I_{dr} + \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

Si on considère que, l'inductance mutuelle  $M$ , l'inductance  $L_s$  est la tension  $V_s$  sont constants, on remarque d'après l'équation (II.27) que la puissance active  $P_s$  est directement proportionnelle au courant rotorique en quadrature  $I_{qr}$ , alors que la puissance réactive  $Q_s$  est proportionnelle au courant rotorique direct  $I_{dr}$ , à une constante près  $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$ .

Pour pouvoir contrôler la machine par les tensions rotoriques, il nous faut alors établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine.

D'après les expressions des flux rotoriques suivantes:

$$\begin{cases} \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_s I_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Et en utilisant l'équation des courants (II.26), nous trouverons la relation entre les tensions et les courants rotoriques, donnée par :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + L_r \sigma \frac{d}{dt} I_{dr} - L_r \sigma \omega \cdot I_{qr} \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + L_r \sigma \frac{d}{dt} I_{qr} + L_r \sigma \omega \cdot I_{dr} + \omega \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \end{cases} \quad (II.29)$$

A partir des équations que nous venons de mettre en place, nous pouvons établir les relations entre les tensions appliquées au rotor de la machine et les puissances statoriques que cela engendre. Il est donc possible de décrire le schéma bloc de machine asynchrone à double alimentation qui sera le bloc à réguler par la suite.

Un schéma bloc pour la simulation de la MADA reliée au réseau est donné par la figure II.3. On voit clairement que les entrées sont les tensions rotoriques et les sorties les puissances statoriques. On voit aussi, qu'ils sont liés par une fonction de transfert du premier ordre. De plus du fait de la faible valeur de  $L_r$ ,  $\sigma$  et le glissement, on peut négliger, sans problème, les couplages entre les deux axes. Donc, une commande séparée des puissances peut être envisagée.

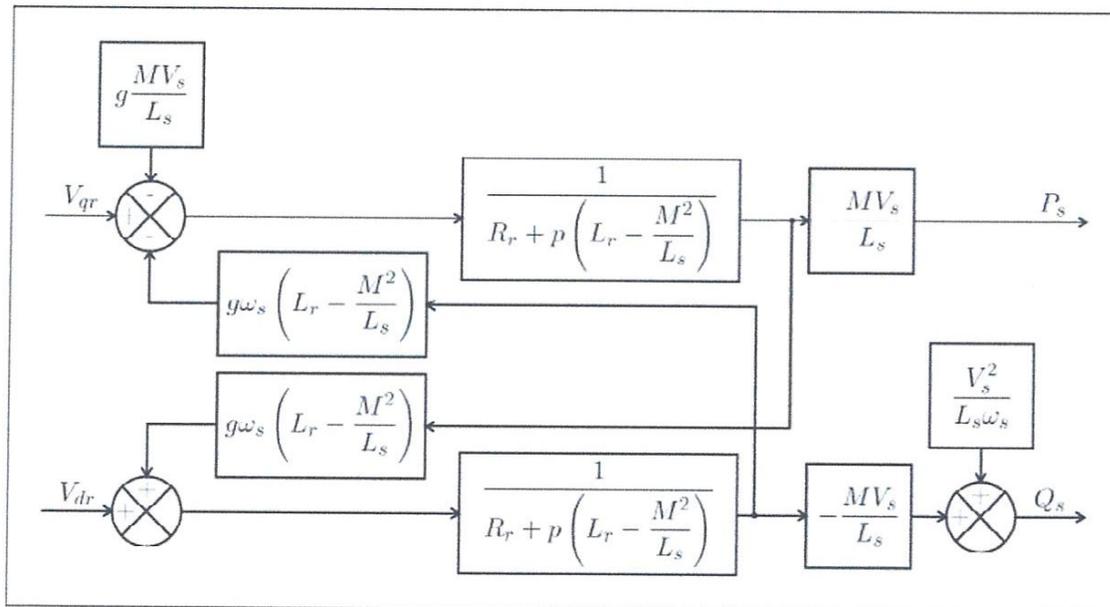


Figure II.3. Schéma bloc de la MADA.

Ainsi, il apparaît deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine [4] :

- La première consiste à négliger les termes de couplage et commander directement et indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode est appelée aussi *méthode directe* car les régulateurs des puissances donnent directement les références des tensions rotoriques à l'onduleur.
- La deuxième tient en compte le couplage et elle utilise deux régulateurs de courant pour le compenser. Donc, on utilise deux régulateurs pour chaque axe, un pour le courant et l'autre pour la puissance. Cette méthode est appelée : *méthode indirecte*.

Pour notre étude nous allons utiliser uniquement la méthode directe.

## 5.2 Réglage directe des puissances active et réactive de la MADA

Dans ce qui suit, nous présentons la régulation indépendante des puissances active et réactive au niveau du stator de la MADA en utilisant un seul régulateur PI (Proportionnel Intégral) pour chaque puissance (chaque axe).

Afin de déterminer le schéma bloc de synthèse des régulateurs, nous considérons le schéma bloc du système à réguler de la figure II.3. Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques, on voit apparaître le terme  $\frac{MV_s}{L_s}$ . En plus, dans notre étude, nous avons considéré que la génératrice est reliée à un réseau de puissance stable, donc ce terme est stable.

D'après les considérations précédentes, pour réguler les puissances, il suffit de mettre des régulateurs indépendants tout en compensant les termes de perturbation qui sont présents dans le schéma bloc de la figure II.3. Dans ces conditions nous obtenant le schéma de réglage suivant :

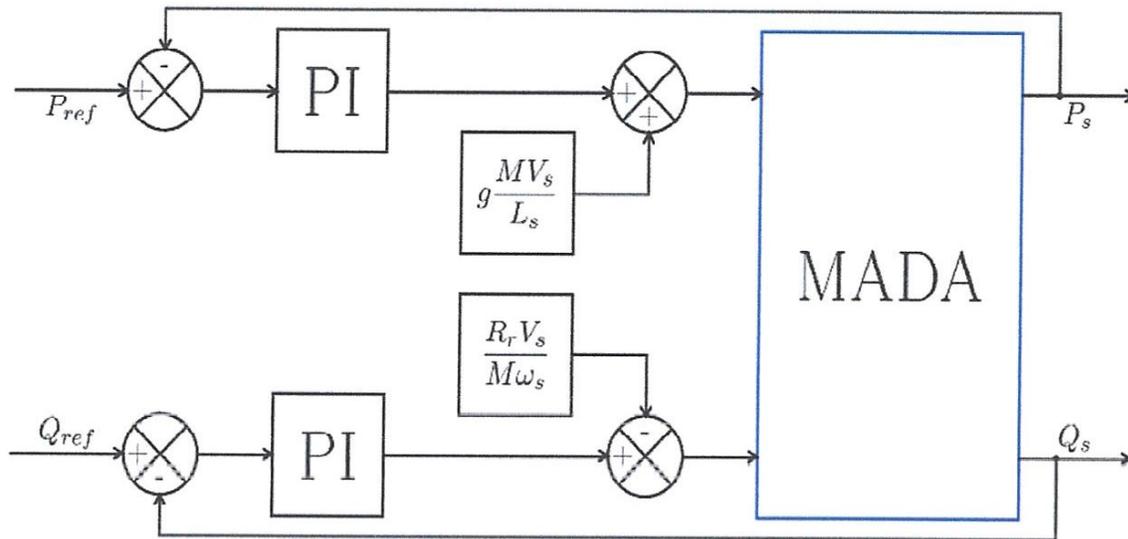


Figure II.4. Schéma bloc de réglage de la MADA.

D'après les schémas bloc, figure II.3 et II.4, on voit bien qu'après compensation des termes constants et en négligeant les termes de couplages, les deux axes présentent la même dynamique. Donc les paramètres des correcteurs PI seront les mêmes.

La figure suivante (II.5) montre le schéma bloc qui sera utilisé pour la synthèse du correcteur PI par la suite :

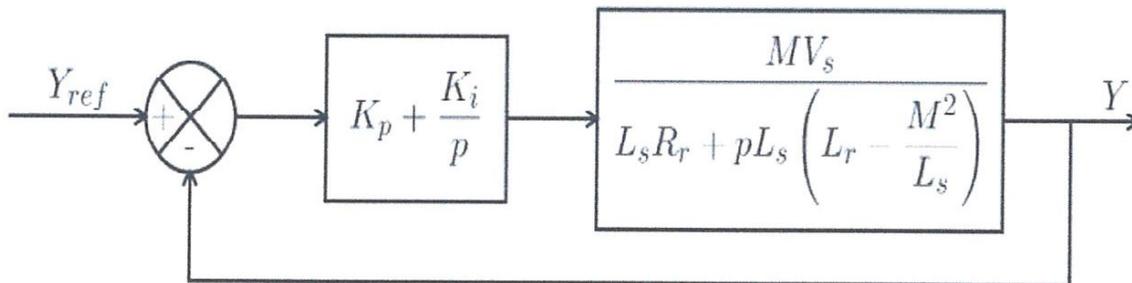


Figure II.5. Schéma bloc pour la détermination du PI.

Le régulateur PI utilisé pour le réglage des puissances active et réactive, offre plusieurs avantages notamment la rapidité et la simplicité à mettre en œuvre, ainsi qu'il offre des performances acceptables à la régulation du système considéré [4].

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes de la conception des régulateurs PI. Dans notre travail, nous allons utiliser une synthèse optimale des paramètres du PI par l'utilisation d'un algorithme génétique standard. Cette démarche sera présentée dans le chapitre suivant.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons rappelé la structure de la MADA, ainsi que son modèle mathématique dans le repère naturel (a, b, c). Ce modèle est non linéaire et fortement couplé.

Pour contourner cette difficulté, on a fait appel à la transformation de Park. Cette transformation nous a permis de trouver un modèle plus simple à manipuler pour faire des simulations ou pour développer des lois de commande par la suite.

En se basant sur le modèle de la MADA écrit dans le plan de Park, nous avons présentée le principe d'une commande vectorielle par orientation du flux statorique qui permet de contrôler les puissances active et réactive statoriques par action découplée sur les tensions rotoriques  $V_{qr}$  et  $V_{dr}$  de la MADA.

Nous rappelons que la synthèse des correcteurs PI sera faite dans le chapitre suivant, et pour la validation de la méthode de commande, des résultats de simulations sur MATLAB/SIMULINK seront présentés.

# Troisième Chapitre

## **CHAPITRE III:**

# **Synthèse optimale des régulateurs de puissances par algorithme génétique**

### **1. Introduction :**

Ce chapitre sera consacré à l'utilisation d'un algorithme génétique standard, très connu dans le domaine de l'optimisation, pour une synthèse optimale des régulateurs, de puissances active et réactive statoriques, utilisés dans le système de conversion éolien.

L'objectif de l'utilisation de cette méthode est de concevoir un système de synthèse optimal des régulateurs sans faire un calcul analytique par l'utilisation des méthodes classique. Aussi, cette démarche standard peut être utilisée pour tout type de correcteur : PI, IP, ordre élevé, RST,

Ce chapitre sera consacré dans une première partie à la description de la méthode d'optimisation par algorithme génétique. Puis, dans la deuxième partie, nous appliquons cet algorithme pour la synthèse des régulateurs utilisés dans le réglage des puissances. Ce chapitre sera terminé par une présentation des résultats de simulation sous l'environnement MATLAB.

### **2. Présentation de l'algorithme génétique standard:**

#### **2.1 Introduction sur les algorithmes génétiques**

Dans la nature, les êtres vivants croissent et interagissent les uns avec les autres. Chaque individu est caractérisé par un génotype indépendant de l'environnement où il vit. Les opérateurs génétiques fonctionnent au niveau génotypique tandis que le mécanisme de sélection opère au niveau phénotypique (le phénotype d'un individu est l'ensemble des traits caractéristiques d'un individu, alors que le génotype est le codage de ces traits en gènes). Les algorithmes génétiques sont à la

base des algorithmes d'optimisation stochastiques. Ils sont très utilisés aujourd'hui dans plusieurs domaines à cause de leur fiabilité (ils donnent généralement l'optimum global) et leur robustesse (ils peuvent optimiser tout type de fonctions: linéaires, non linéaires, dérivables ou non, continues ou discontinues...), [10], [11], [12].

Les Algorithmes Génétiques diffèrent fondamentalement des autres méthodes dans la recherche de l'optimum [10]:

- Ils utilisent un codage des paramètres de la fonction à optimiser et non les paramètres eux-mêmes.
- Ils agissent sur un ensemble de configurations et non sur un point unique.
- Ils n'utilisent que les valeurs de la fonction à optimiser, pas sa dérivée ou une autre connaissance auxiliaire.
- Ils utilisent des règles de transitions probabilistes (non déterministes).

## 2.2 Principe des algorithmes génétiques

À présent, nous allons expliciter rapidement le principe de fonctionnement des algorithmes génétiques. Nous reviendrons plus en détail sur les différentes étapes par la suite.

Les opérations successives utilisées dans les algorithmes génétiques sont illustrées sur la figure ci-après [10], [12] :

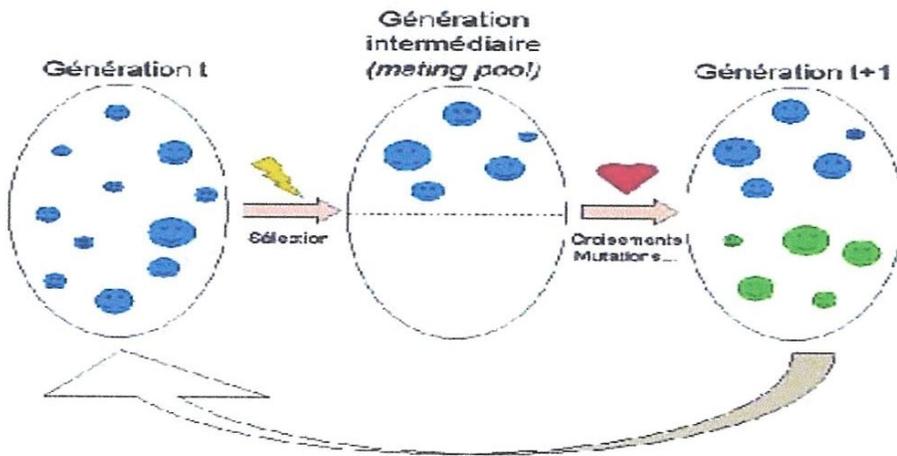


Figure III.1 Principes généraux des algorithmes génétiques

- a) On commence par générer une population d'individus de façon aléatoire.
- b) On sélectionne un certain nombre d'individus dans la population, afin de générer une population intermédiaire, appelée aussi « mating pool ».
- c) Deux parents sont ensuite sélectionnés (P1 et P2) en fonction de leurs adaptations. On applique aléatoirement l'opérateur de croisement avec une probabilité  $P_c$  qui génère deux enfants C1 et C2. L'opérateur de croisement est traditionnellement l'heuristique prépondérante d'un algorithme génétique. On modifie ensuite certains gènes de C1 et C2 en appliquant l'opérateur de mutation avec la probabilité  $P_m$ , ce qui produit deux nouveaux individus C'1 et C'2 pour lesquels on évalue le niveau d'adaptation avant de les insérer dans la nouvelle population. Contrairement à la sélection et au croisement qui favorisent l'intensification, cet opérateur favorise la diversification des individus. On répète les opérations de sélection, de croisement et de mutation afin de compléter la nouvelle population, ceci termine le processus d'élaboration d'une génération.
- d) On répète les opérations précédentes à partir de l'étape (b) jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait. Différents critères d'arrêt de l'algorithme peuvent être choisis à savoir: nombre de générations fixé, limite de convergence de la population, population qui n'évolue plus suffisamment, etc.

Il n'existe pas qu'une seule manière de définir les mécanismes des algorithmes génétiques. Ainsi, le codage et l'évaluation des individus, la sélection, le croisement et la mutation peuvent différer d'un problème à un autre (et chaque utilisateur aura même ses préférences).

### 2.3 Structure de l'algorithme génétique :

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et de l'évolution naturelle : croisements, mutations, sélection, etc.

Un organigramme fonctionnel de cet algorithme est donné par la figure suivante, Figure III.2, [10-12].

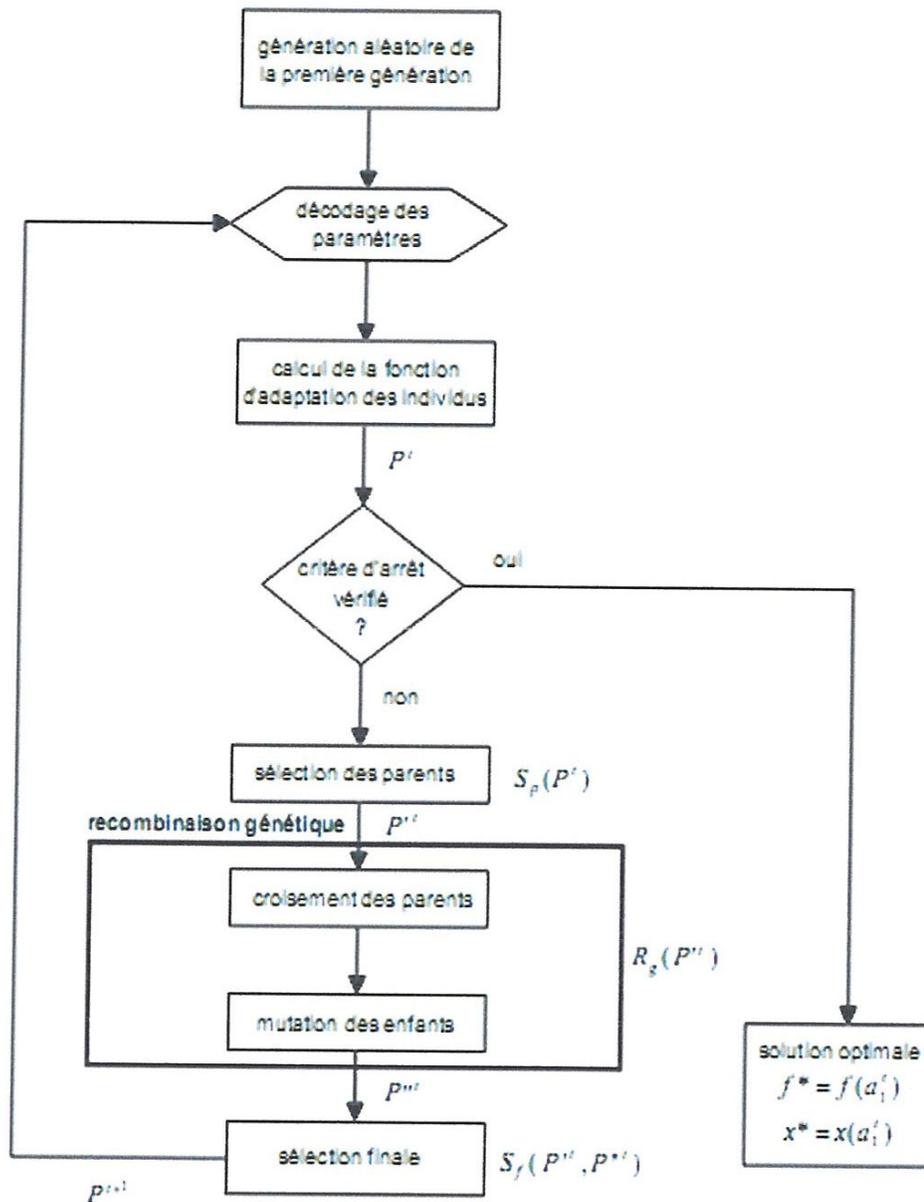


Figure III.2 Structure de l'algorithme génétique

a) Génération aléatoire de la population initiale :

Le choix de la population initiale d'individus conditionne fortement la rapidité de l'algorithme. Si la position de l'optimum dans l'espace d'état est totalement inconnue, il est naturel de générer aléatoirement des individus en faisant des tirages uniformes dans chacun des domaines associés aux composantes de l'espace d'état en veillant à ce que les individus produits respectent les contraintes. Si par contre,

des informations à priori sur le problème sont disponibles, il paraît bien évidemment naturel de générer les individus dans un sous-domaine particulier afin d'accélérer la convergence.

**b) Codage des paramètres :**

A chaque variable d'optimisation  $x_i$  (à chaque paramètre de la fonction objectif), nous faisons correspondre un *gène*. Nous appelons *chromosome* un ensemble de gènes. Chaque solution du problème est représentée par un *individu* doté d'un génotype constitué d'un chromosome. Nous appelons *population* un ensemble de  $N$  individus (solutions) que nous allons faire évoluer.

On aboutit à une structure présentant cinq niveaux d'organisation, figure III.3, d'où résulte le comportement complexe des AG, [10-12] :

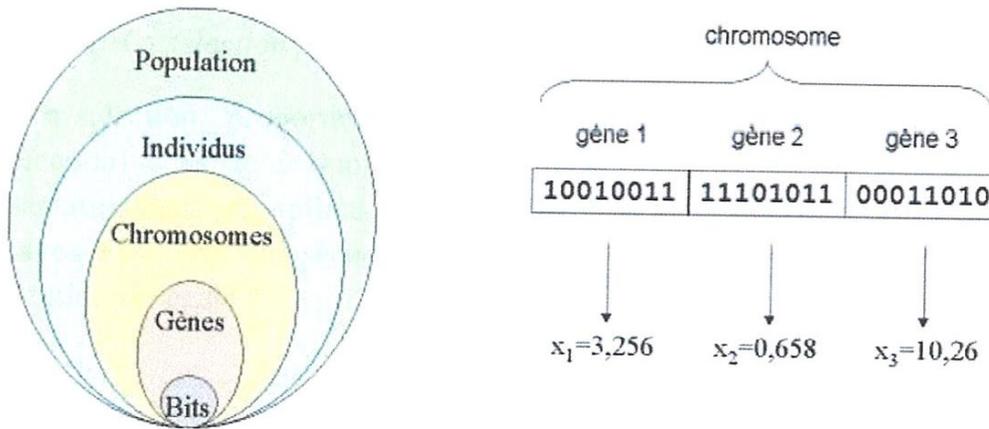


Figure III.3 les cinq niveaux d'organisation d'un algorithme génétiques

Un des avantages du codage binaire est que l'on peut ainsi facilement coder toutes sortes d'objets: des réels, des entiers, des valeurs booléennes, des chaînes de caractères... Cela nécessite simplement l'usage de fonctions de codage et décodage pour passer d'une représentation à l'autre.

Les formules de décodage sont alors les suivantes :

$$N(x_i) = \sum_{i=0}^{l_n-1} 2^{l_{x_i}-i-l_{b_i}} \quad (III.1)$$

➤ *La sélection linéaire par rapport au rang.*

Avec la sélection linéaire par rapport au rang (Linear Ranking Selection), un individu est choisi aléatoirement avec une probabilité proportionnelle à son rang:

$$P_s(a_j^t) = \frac{1}{N} (\eta_+ - (\eta_+ - \eta_-) \frac{i-1}{N-1}) \quad (\text{III.4})$$

$$\eta_- = 2 - \eta_+ \quad \text{et} \quad 1 \leq \eta_+ \leq 2$$

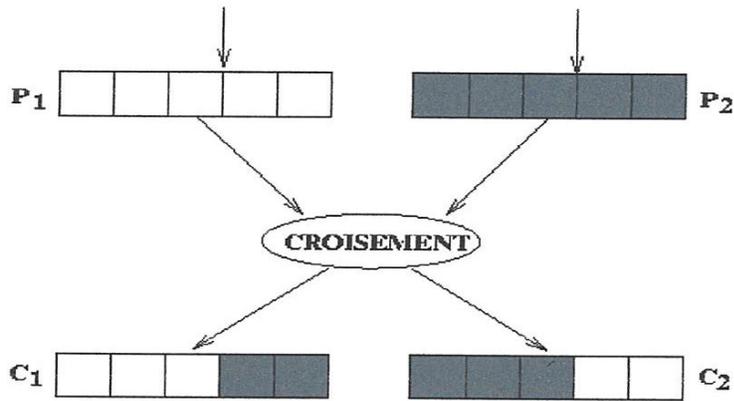
➤ *La sélection par tournoi.*

Lors de la sélection par tournoi (Tournament Selection),  $k$  individus de la population sont choisis aléatoirement et celui, dont la performance est la plus élevée, est retenu pour participer à la reproduction. L'opération répétée autant de fois qu'il y a d'individus à sélectionner. Il est tout à fait possible que certains individus participent à plusieurs tournois: s'ils gagnent plusieurs fois, ils auront donc droit d'être copiés plusieurs fois dans la génération intermédiaire, ce qui favorisera la pérennité de leurs gènes.

Dans notre travail, nous avons choisi cette dernière méthode puisque elle est facile à programmer et elle donne souvent des résultats acceptables.

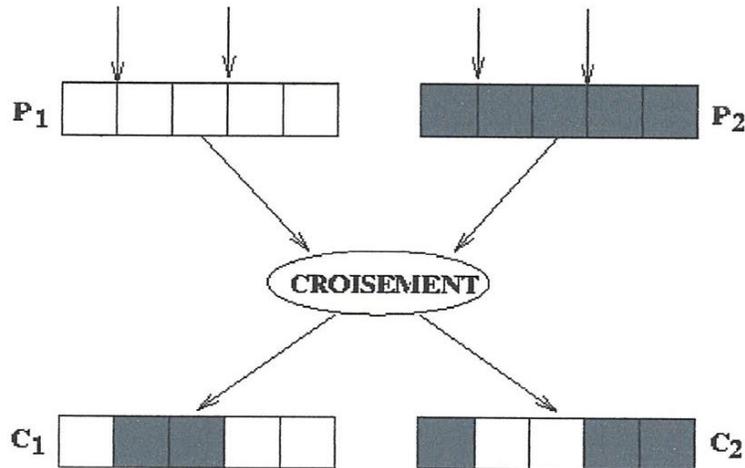
#### **d) Opérateur de Croisement :**

Le croisement a pour but d'enrichir la diversité de la population en manipulant la structure des chromosomes. Classiquement, les croisements sont envisagés avec deux parents et génèrent deux enfants. Initialement, le croisement associé au codage par chaînes de bits est le croisement à découpage de chromosomes (slicing crossover). Pour effectuer ce type de croisement sur des chromosomes constitués de  $M$  gènes, on tire aléatoirement une position dans chacun des parents. On échange ensuite les deux sous-chaînes terminales de chacun des deux chromosomes, ce qui produit deux enfants  $C_1$  et  $C_2$  (voir figure suivante).



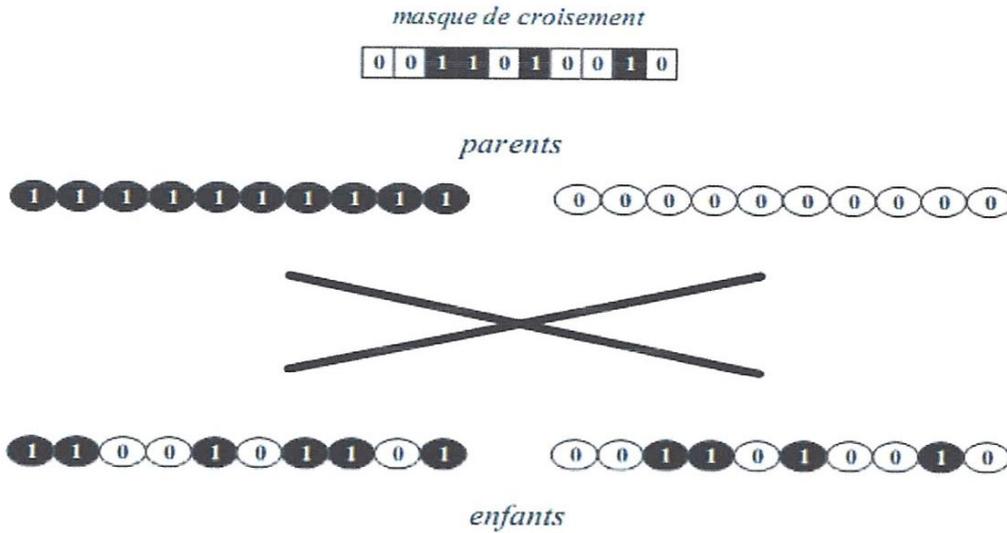
*Figure III.4 Principe de croisement en 1 point*

On peut étendre ce principe en découpant le chromosome non pas en 2 sous-chaînes mais en 3, 4...etc. (Voir figure suivante).



*Figure III.5 Principe de croisement en 2 points*

Il existe aussi un autre type de croisement appelé *Le croisement uniforme*, est obtenu à partir d'un masque binaire initialisé aléatoirement et possédant un nombre de bits égal au nombre de gènes des individus de la population. Le premier enfant est créé en prenant les gènes du premier parent lorsque les bits correspondant dans le masque valent "1" et les gènes du deuxième parent si ces derniers valent "0". Le deuxième enfant s'obtient de la même manière en complémentant le masque. La Figure suivante illustre le processus du croisement uniforme.



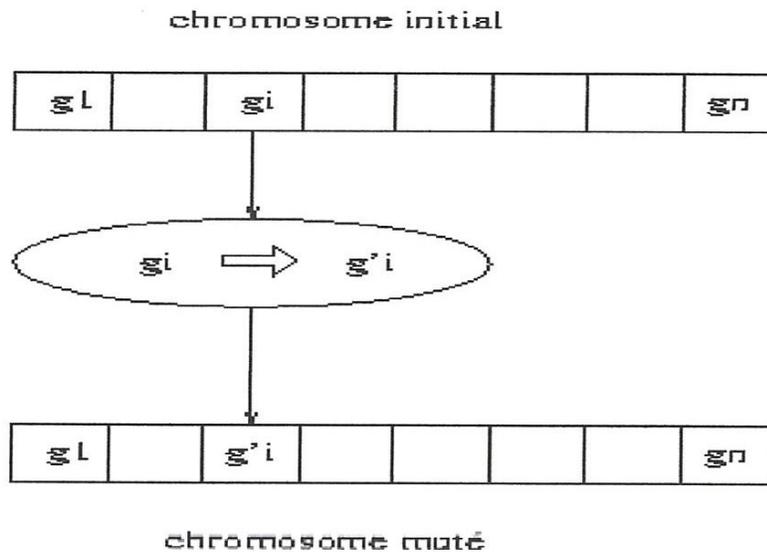
**Figure III.6 Principe de croisement uniforme**

Signalons pour finir que le masque de croisement est généralement construit de manière uniformément aléatoire en respectant l'équiprobabilité d'obtenir une valeur égale à 0 ou 1 pour chaque bit.

On peut imaginer et tester des opérateurs de croisement plus ou moins complexes sur un problème donné mais l'efficacité de ce dernier est souvent liée intrinsèquement au problème.

#### e) Opérateur De Mutation :

De façon aléatoire, un gène peut, au sein d'un chromosome être substitué à un autre, on définit ici un taux de mutation lors des changements de population qui est généralement compris entre 0,001 et 0,01. Il est nécessaire de choisir pour ce taux une valeur relativement faible de manière à ne pas tomber dans une recherche aléatoire et conserver le principe de sélection et d'évolution. La mutation sert à éviter une convergence prématurée de l'algorithme. Par exemple lors d'une recherche d'extremum la mutation sert à éviter la convergence vers un extremum local. Le principe de la mutation est représenté sur la figure suivante :



*Figure III.7 Principe de la mutation*

Concrètement, l'opérateur de mutation consiste à compléter (inverser) la valeur d'un bit du chromosome avec une probabilité  $p_m$ .

#### f) La sélection finale :

À la suite de la recombinaison génétique, la population compte  $2N$  individus ( $N$  parents et  $N$  enfants). Il faut donc éliminer  $N$  individus pour constituer la génération suivante. C'est le rôle de la sélection finale, qui agit sur les populations de parents et d'enfants d'une génération pour créer la nouvelle génération [10-12].

$$P^{t+1} = S_f(P^{t'}, P^{t''}) = (a_1^{t+1}, a_2^{t+1}, \dots, a_N^{t+1}) \quad (\text{III.4})$$

Pour effectuer cette sélection entre parents et enfants, plusieurs stratégies sont possibles.

#### ➤ La sélection par descendance :

Avec la sélection par descendance ou sélection générationnelle (Generational Selection), il n'y a aucune compétition entre parents et enfants. La population de la

nouvelle génération est obtenue par descendance, les enfants remplaçant automatiquement leurs parents quelle que soit leur adaptation.

L'inconvénient de ce mode de sélection est que l'on risque de voir disparaître les caractéristiques génétiques des parents les mieux adaptés si elles n'ont pas été totalement transmises lors de la recombinaison génétique.

➤ *Les sélections élitistes :*

Les sélections élitistes au contraire préservent certains parents des effets destructeurs du croisement et de la mutation. La stratégie élitiste classique, couramment employée, garantit la survie du meilleur parent à chaque génération.

D'autres variantes consistent à réaliser des compétitions entre parents et enfants pour déterminer les "survivants" de la génération (comme dans le cas de la sélection par tournoi).

Les enfants peuvent par exemple être insérés dans la population si et seulement si leur performance est supérieure à celle de leurs parents à rang équivalent :

Il est aussi possible de retenir après croisement les deux meilleurs individus entre les deux parents et leurs deux descendants. On peut enfin choisir un plan d'élitisme sévère en gardant les  $N$  meilleurs individus parmi la population intermédiaire de parents et d'enfants.

**g) La convergence des algorithmes génétiques**

Un aspect important des algorithmes génétiques, pourtant peu abordé à ce jour, concerne le choix du critère de convergence. Quand peut-on considérer que l'algorithme a convergé vers l'optimum global ?

Le problème est généralement éludé en imposant un nombre de génération maximal  $t_{\max}$  et en arrêtant la recherche lorsque  $t = t_{\max}$ . On estime alors que l'algorithme a convergé et que l'individu de plus forte performance dans la population  $P_{t_{\max}}$  correspond à la solution recherchée.

Une méthode plus "rigoureuse" consiste à supposer que l'algorithme converge vers l'optimum lorsque l'adaptation d'une partie (ou de l'ensemble) de la population se rapproche de celle du meilleur individu (voir Figure suivante).

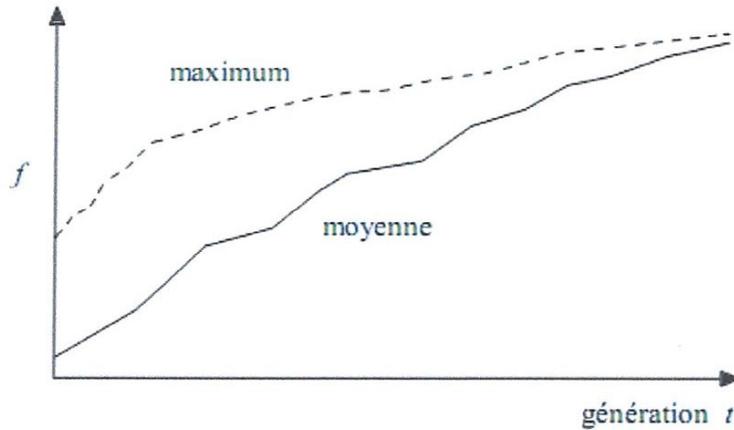


Figure III.8 Convergence de l'algorithme génétique

Nous pouvons aussi supposer que l'algorithme a convergé lorsque le meilleur individu de la population n'évolue plus. Il suffit pour cela de tester la variation de sa performance sur une série de générations.

### 3. Application de l'algorithme génétique pour la synthèse des correcteurs:

#### 3.1 Détermination de l'objectif à optimiser

Dans notre problème, nous cherchons à déterminer les meilleurs paramètres  $K$  et  $t_i$  du correcteur PI, équation III.5, utilisé pour le réglage des puissances active et réactive statoriques.

$$PI(p) = k \frac{(t_i p + 1)}{p} \quad (\text{III.4})$$

Pour que le réglage des puissances suive une dynamique bien déterminée à l'avance, nous avons opté pour l'utilisation d'un modèle de référence lors du processus d'optimisation off ligne. Le système utilisé est donné par la figure suivante :

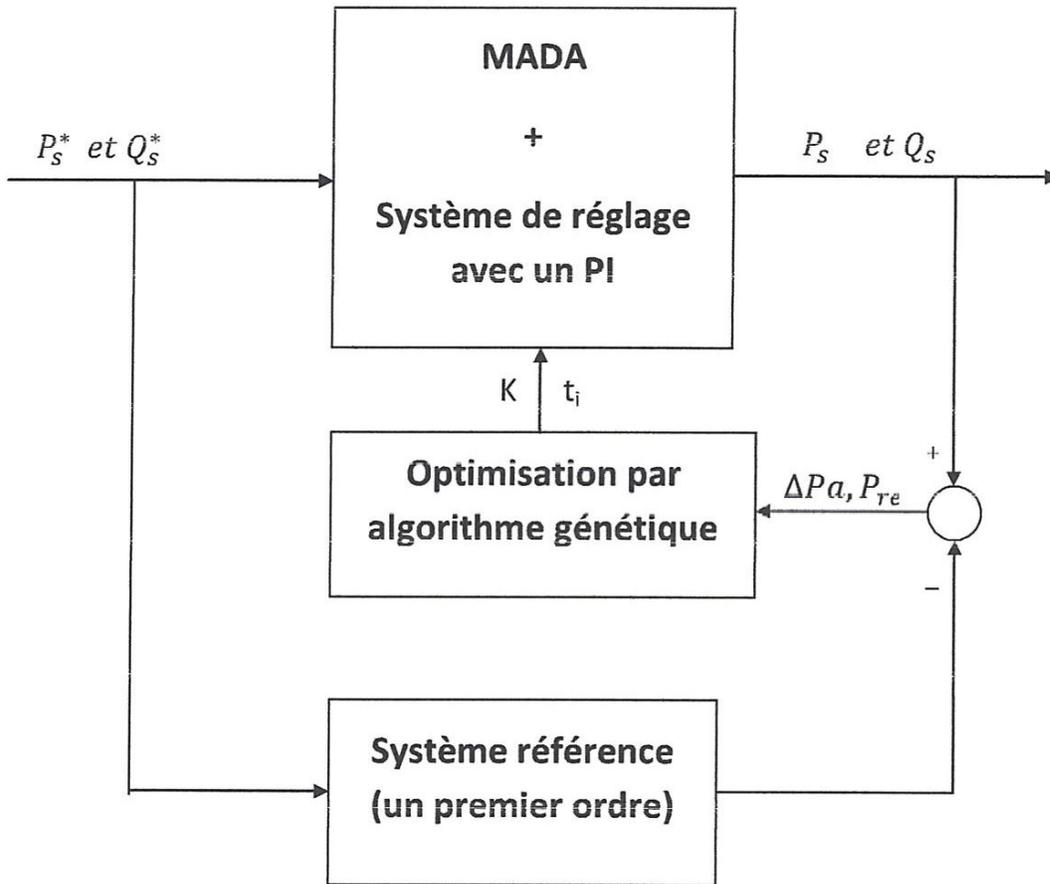


Figure III.9 système utilisé pour la synthèse des correcteurs

D'après la figure précédente, la fonction objective  $f_{obj}(k, ti)$  est définie par l'intégrale de la valeur absolue de la différence entre la réponse du système réel et du système de référence. Cette erreur est donnée par l'équation suivante :

$$f_{obj}(k, ti) = \int_0^t |y_{réf} - y| dt \quad (III.6)$$

Où :  $r_{éf}$  est la sortie du système de référence

$y$  est la sortie du système à régler

Pour des raisons de simplicité et de rapidité de l'algorithme d'optimisation, nous avons utilisé le schéma bloc de la figure II.5 comme système à réglé (MADA + réglage) et un premier ordre (caractérisé par une constante du temps prédéfinie  $t_{réf}$ ) comme système de référence.

### **3.2 Résultats de simulation**

Pour la simulation, nous avons utilisé les paramètres suivants :

➤ **Paramètres de la MADA [4]**

$V_s=220;$

$R_s =0.455;$

$R_r =0.19;$

$L_s =0.07;$

$L_r =0.0213;$

$M = 0.034;$

$p = 2.$

➤ **Paramètres de l'algorithme génétique**

Nombre de la population=50

Nombre des itérations=100

Langueur binaire de chaque paramètre= 15 bits

Probabilité de croisement =100%

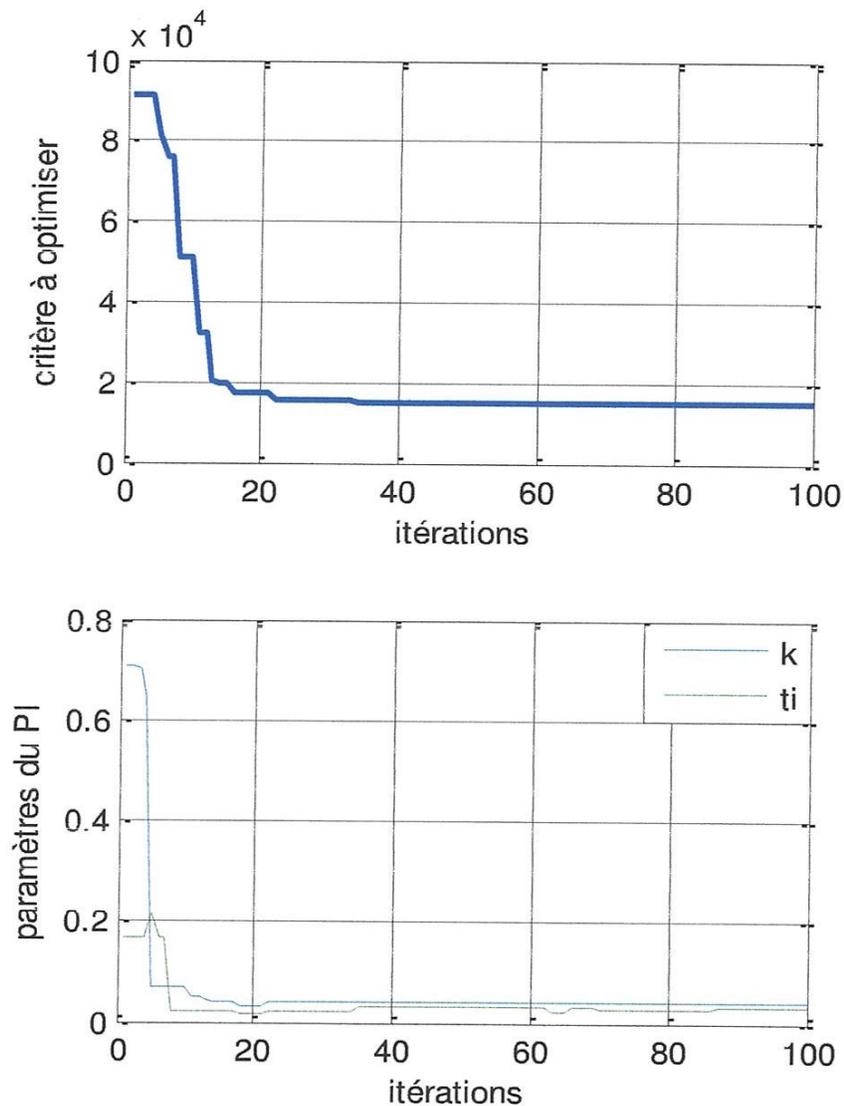
Probabilité de mutation= 1%

Intervalle des paramètres (0.0001 10)

➤ **Système de référence**

Nous avons utilisé un premier ordre d'une constante de temps égale à 0.05s.

La référence prend la valeur de -5000 pendant 0.5 seconde puis -10000 pendant l'autre moitié.



*Figure III.10 variation de la fonction objectif et des paramètres du PI*

Les paramètres trouvés à la fin du processus d'optimisation sont donnés les suivants :

$$K= 0.0401 \quad \text{et} \quad t_i= 0.03$$

Le schéma bloc de réglage des puissances active et réactive du stator de la MADA est donné par la figure suivante :

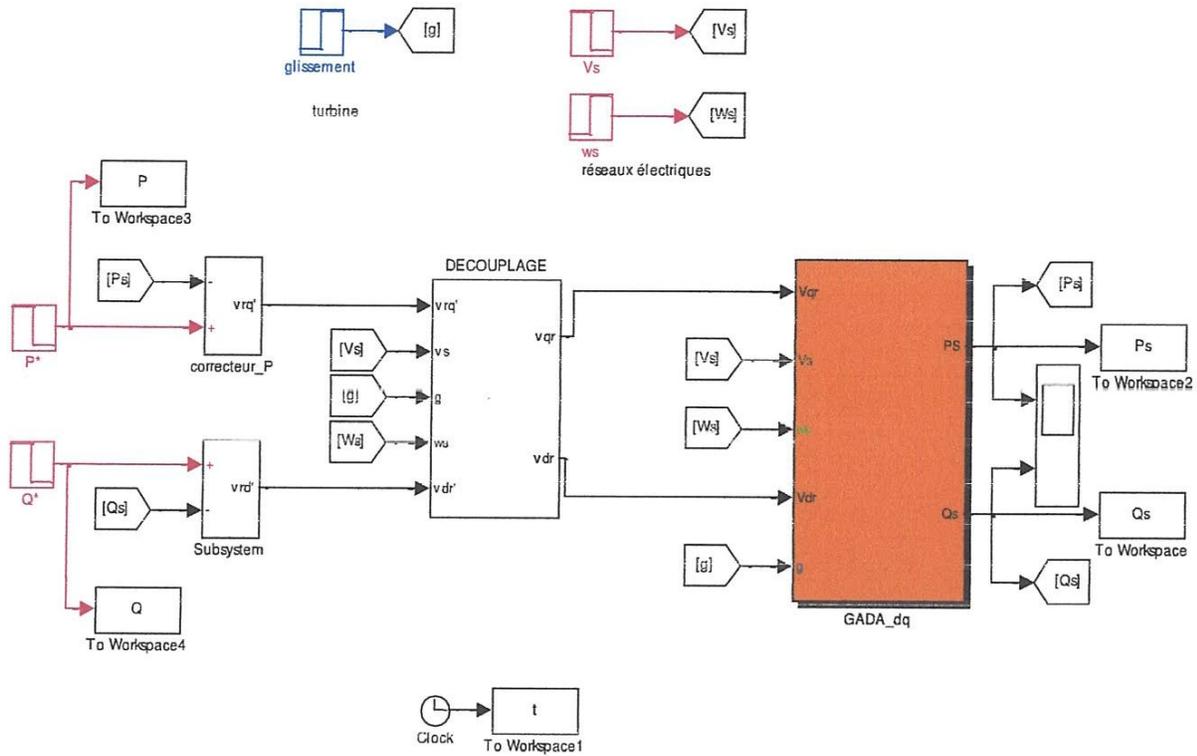


Figure III.11 Schéma bloc utilisé dans l'environnement SIMULINK

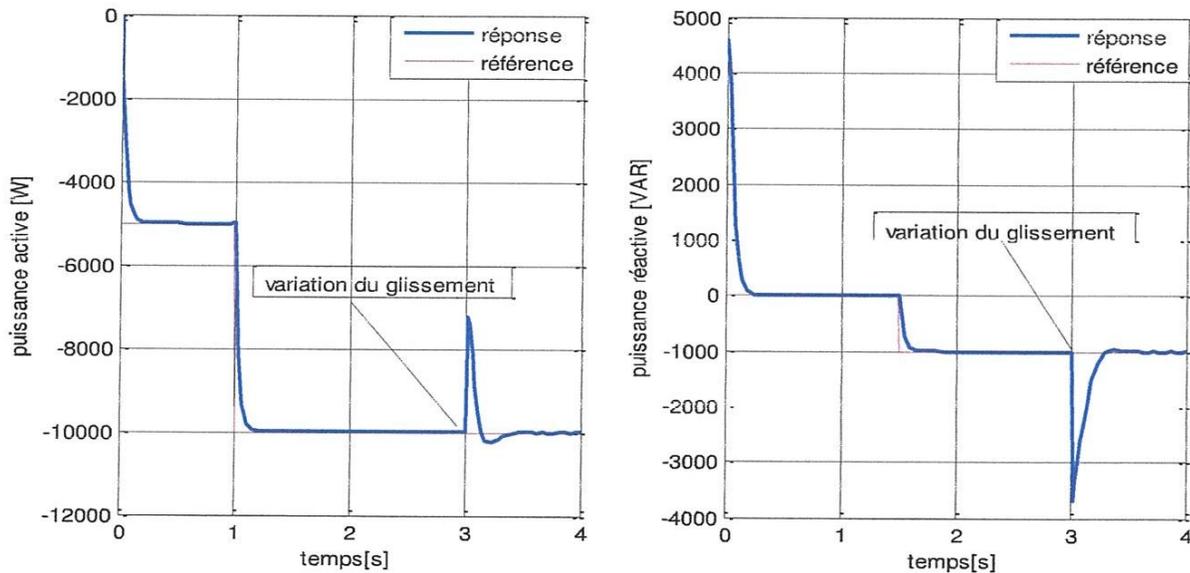


Figure III.12 variation des puissances active et réactive statorique

D'après les résultats obtenus, on constate que le contrôle direct utilisant des régulateurs PI présente un bon découplage au réglage des puissances actives et réactive au niveau du stator et une bonne poursuite à leurs valeurs de références imposées dans le cas d'un entraînement à vitesse constante de la MADA (figure III.12). En plus, on voit clairement d'après les réponses que la dynamique de réponse est égale à celle du système de référence choisi lors du processus d'optimisation. Cela confirme l'efficacité de cet algorithme utilisé pour la synthèse des correcteurs PI. Cependant, le test de la variation du glissement de 0 à 0.1 fait apparaître des petits pics au niveau des réponses en puissance, mais le système élimine cette erreur après un temps très court.

## **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe d'un algorithme génétique standard, puis nous l'avons appliqué pour la synthèse des correcteurs utilisés pour le réglage des puissances active et réactive d'une MADA raccordée à un réseau de puissance.

Les résultats de simulation sous l'environnement MATLAB/SIMULINK montre clairement l'efficacité de cette commande vectorielle par orientation du flux statorique. Ces résultats, valident aussi l'approche standard proposée pour la synthèse des régulateurs PI.

# Conclusion Générale

## Conclusion générale :

Dans ce travail nous avons présenté la machine asynchrone double alimentée comme étant une solution prometteuse dans les applications de génération de l'énergie électrique à vitesse variable, notamment l'énergie éolienne.

Ce type de machine peut fonctionner dans un mode peu particulier dans les deux quadrants (en moteur ou en génératrice), de plus cette dernière (MADA) offre une large gamme opérationnelle en vitesse (hypo synchronisme ou hyper synchronisme).

Dans ce contexte, nous avons commencé dans le premier chapitre par une étude, non exhaustive, concernant l'énergie renouvelable et particulièrement l'énergie éolienne. En effet, des notions principales sur les aérogénérateurs ont été données.

Dans le deuxième chapitre, une modélisation en vue de la commande de la MADA en mode génératrice raccordée au réseau de puissance a été présentée. Ce modèle basé sur la transformation de PARK, a été utilisé par la suite pour l'élaboration d'une loi de commande vectorielle à flux statorique orienté. Cette technique, très utilisée pour la commande des machines à courant alternatif à cause de ces performances et de sa simplicité, nous a permis de réaliser un contrôle découplé des puissances active et réactive via les tensions rotoriques.

Pour assurer une bonne synthèse des correcteurs linéaires PI utilisés dans les boucles de réglage, nous avons utilisé une méthode d'optimisation par algorithme génétique dont le principe a été présenté dans le troisième chapitre.

A la fin du troisième chapitre, des résultats de simulation ont été présentés pour mettre en évidence l'efficacité de la démarche utilisée.

Nous pouvons conclure que cette démarche de synthèse standard peut être appliquée pour d'autre type de correcteurs plus complexes que le PI classique et dont la synthèse par des méthodes analytiques est très laborieuse.

# Annexe



*Programme des énergies renouvelables et de  
l'efficacité énergétique.*



*Mars 2011*

## **Les énergies renouvelables, une priorité en Algérie**

### **Chapitre I. Programme des énergies renouvelables**

I.1 Energie solaire photovoltaïque

I.2 Energie solaire thermique

I.3 Energie éolienne

### **Chapitre II. Développement des capacités industrielles**

## **Les énergies renouvelables, une priorité en Algérie :**

L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables (EnR) et d'efficacité énergétique. Cette vision du gouvernement algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Grâce à la combinaison des initiatives et des intelligences, l'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable.

Le programme consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de près de 22 000 MW entre 2011 et 2030 dont 12 000 MW seront dédiés à couvrir la demande nationale en électricité et 10 000 MW à l'exportation. L'exportation de l'électricité est toutefois conditionnée par l'existence d'une garantie d'achat à long terme, de partenaires fiables et de financements extérieurs.



A la faveur de ce programme, les énergies renouvelables se placent au cœur des politiques énergétique et économique menées par l'Algérie : d'ici 2030, environ 40% de la production d'électricité destinée à la consommation nationale sera d'origine renouvelable. En effet, l'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir du solaire photovoltaïque et du solaire thermique qui seront les moteurs d'un développement économique durable à même d'impulser un nouveau modèle de croissance.

Le potentiel national en énergies renouvelables étant fortement dominé par le solaire, l'Algérie considère cette énergie comme une opportunité et un levier de développement économique et social, notamment à travers l'implantation d'industries créatrices de richesse et d'emplois. Comparativement, les potentiels en éolien, en biomasse, en géothermie et en hydroélectricité sont beaucoup moins importants. Cela n'exclut pas pour autant le lancement de nombreux projets de réalisation de fermes éoliennes et la mise en œuvre de projets expérimentaux en biomasse et en géothermie.

Le programme inclut la réalisation, d'ici 2020, d'une soixantaine de centrales solaires photovoltaïques et solaires thermiques, de fermes éoliennes et de centrales hybrides.

Les projets EnR de production de l'électricité dédiés au marché national seront menés en trois étapes :

Une première étape, entre 2011 et 2013, sera consacrée à la réalisation de projets pilotes pour tester les différentes technologies disponibles;

La seconde étape, en 2014 et 2015, sera marquée par le début du déploiement du programme;

La dernière étape, de 2016 à 2020, sera celle du déploiement à grande échelle.

Ces étapes consacrent la stratégie de l'Algérie qui vise à développer une véritable industrie du solaire associée à un programme de formation et de capitalisation qui permettra, à terme, d'employer le génie local algérien et d'asseoir un savoir-faire efficient, notamment en matière d'engineering et de management de projets. Le programme EnR, pour les besoins d'électricité du marché national, permettra la création de plusieurs milliers d'emplois directs et indirects.

Aujourd'hui, les besoins énergétiques de l'Algérie sont satisfaits, presque exclusivement, par les hydrocarbures, notamment le gaz naturel, énergie la plus disponible. Il n'est donc fait appel aux autres formes d'énergie que lorsque le gaz ne peut pas être utilisé. A long terme, la reconduction du modèle national de consommation énergétique actuel peut rendre problématique l'équilibre offre-demande pour cette source d'énergie.

Les niveaux des besoins en gaz naturel du marché national seraient de l'ordre de 45 milliards de m<sup>3</sup> en 2020 et 55 milliards de m<sup>3</sup> en 2030. A ces besoins s'ajoutent les volumes dédiés à l'exportation dont les revenus contribuent au financement de l'économie nationale.

## Chapitre I. Programme des énergies renouvelables :

L'Algérie s'engage avec détermination sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile.

Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Le solaire devrait atteindre d'ici 2030 plus de 37% de la production nationale d'électricité.

Malgré un potentiel assez faible, le programme n'exclut pas l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3% de la production d'électricité en 2030.

L'Algérie prévoit également l'installation de quelques unités de taille expérimentale afin de tester les différentes technologies en matière de biomasse, de géothermie et de dessalement des eaux saumâtres par les différentes filières d'énergie renouvelable.

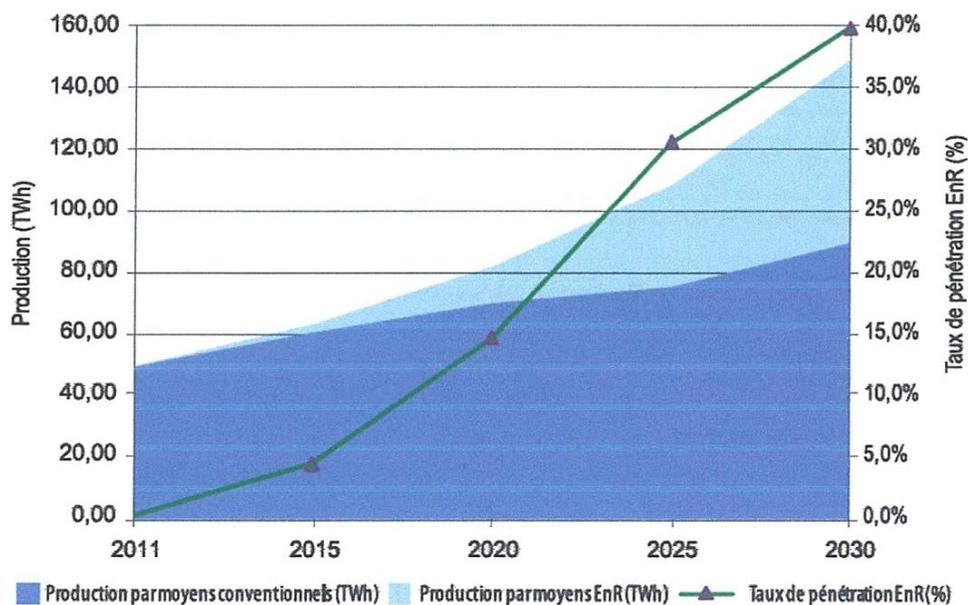


Figure 1: pénétration des EnR dans la production nationale en TWh.

L'énergie solaire photovoltaïque est une source d'énergie non polluante. Modulaires, ses composants se prêtent bien à une utilisation innovante et esthétique en architecture.

La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MWc d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MWc par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030.

## **I.2 Energie solaire thermique**

L'énergie solaire thermique est la transformation du rayonnement solaire en énergie thermique. Cette transformation peut être utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des turboalternateurs et ainsi obtenir de l'énergie électrique). En utilisant la chaleur transmise par rayonnement plutôt que le rayonnement lui-même, ces modes de transformation d'énergie se distinguent des autres formes d'énergie solaire comme les cellules photovoltaïques.

La radiation directe du soleil est concentrée par un collecteur sur un échangeur où elle est cédée à un fluide, soit vaporisé directement, soit transportant la chaleur à un générateur de vapeur. Tous les systèmes ont en commun un certain nombre d'organes : un collecteur qui concentre la chaleur, un liquide ou un gaz caloporteur qui la transporte jusqu'à un point d'extraction, un évaporateur, un condenseur, une turbine et un alternateur.

Plus connu sous le nom de « concentrating solar power » (CSP), le solaire thermique peut répondre à la demande en électricité de jour comme de nuit en étant couplé à des moyens de stockage thermique ou hybridé avec d'autres énergies comme le gaz.

L'Algérie entend mettre en valeur son potentiel solaire, l'un des plus importants au monde, en lançant des projets importants en solaire thermique.

Deux projets pilotes de centrales thermiques à concentration avec stockage d'une puissance totale d'environ 150 MW chacune seront lancés sur la période

2011-2013. Ces projets s'ajouteront à la centrale hybride de **Hassi R'Mel** d'une puissance de 150 MW, dont 25 MW en solaire.

Sur la période 2016-2020, quatre centrales solaires thermiques avec stockage d'une puissance totale d'environ 1 200 MW devraient être mises en service. Le programme de la phase 2021-2030 prévoit l'installation de 500 MW par an jusqu'en 2023, puis 600 MW par an jusqu'en 2030.

### **1.3 Energie éolienne**

Par définition, l'énergie éolienne est l'énergie produite par le vent. Elle est le fruit de l'action d'aérogénérateurs, de machines électriques mues par le vent et dont la fonction est de produire de l'électricité.

Une hélice entraînée en rotation par la force du vent permet la production d'énergie mécanique ou électrique en tout lieu suffisamment venté. L'énergie du vent captée sur les pales entraîne le rotor qui, couplé à une génératrice, convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. La quantité d'énergie produite par une éolienne dépend principalement de la vitesse du vent mais aussi de la surface balayée par les pales et de la densité de l'air.

Le programme EnR algérien prévoit dans un premier temps, sur la période 2011-2013, l'installation de la première ferme éolienne d'une puissance de 10 MW à Adrar. Entre 2014 et 2015, deux fermes éoliennes de 20 MW chacune devraient être réalisées.

Des études seront menées pour détecter les emplacements favorables afin de réaliser d'autres projets sur la période 2016-2030 pour une puissance d'environ 1 700 MW.

## Chapitre II. Développement des capacités industrielles

L'Algérie favorise la recherche pour faire du programme EnR un véritable catalyseur du développement d'une industrie nationale qui valorisera les différentes potentialités algériennes (humaines, matérielles, scientifiques...etc.) Le rôle de la recherche est d'autant plus crucial qu'elle constitue un élément primordial dans l'acquisition des technologies, le développement des savoirs et l'amélioration des performances énergétiques. Pour l'Algérie, accélérer l'acquisition et le recours aux technologies est essentiel notamment en matière de photovoltaïque et de solaire thermique.

L'Algérie encourage également la coopération avec les centres de recherche en vue de développer les technologies et les procédés innovants en matière d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables. Les universités, les centres de recherche, les entreprises et les différents acteurs du programme EnR collaborent pour sa mise en œuvre et interviennent sur les différentes étapes de la chaîne d'innovation. Ils valorisent ainsi davantage les atouts dont dispose le pays.

En effet, le développement à grande échelle des énergies renouvelables et la prise en charge de la problématique de l'efficacité énergétique exigent un encadrement de qualité en ressources humaines à la hauteur des objectifs et des ambitions du programme EnR.

Outre les centres de recherche affiliés aux entreprises comme le CREDEG, filiale du Groupe **Sonelgaz**, le secteur de l'énergie et des mines compte une agence de promotion et de rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APRUE) et une société spécialisée dans le développement des énergies nouvelles et renouvelables (NEAL). Ces organismes coopèrent avec des centres de recherche attachés au ministère de la recherche scientifique parmi lesquels figurent le CDER et l'UDTS. Le CDER, centre de développement des énergies renouvelables, est chargé d'élaborer et de mettre en œuvre les programmes de recherche et de développement, scientifiques et technologiques, des systèmes énergétiques exploitant l'énergie solaire, éolienne, géothermique et l'énergie de la biomasse.

Le programme EnR algérien prévoit dans un premier temps, sur la période 2011-2013, l'installation de la première ferme éolienne d'une puissance de 10 MW à Adrar. Entre 2014 et 2015, deux fermes éoliennes de 20 MW chacune devraient être réalisées.

Des études seront menées pour détecter les emplacements favorables afin de réaliser d'autres projets sur la période 2016-2030 pour une puissance d'environ 1 700 MW.

L'Algérie favorise la recherche pour faire du programme EnR un véritable catalyseur du développement d'une industrie nationale qui valorisera les différentes potentialités algériennes (humaines, matérielles, scientifiques... etc.) Le rôle de la recherche est d'autant plus crucial qu'elle constitue un élément primordial dans l'acquisition des technologies, le développement des savoirs et l'amélioration des performances énergétiques. Pour l'Algérie, accélérer l'acquisition et le recours aux technologies est essentiel notamment en matière de photovoltaïque et de solaire thermique.

L'Algérie encourage également la coopération avec les centres de recherche en vue de développer les technologies et les procédés innovants en matière d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables. Les universités, les centres de recherche, les entreprises et les différents acteurs du programme EnR collaborent pour sa mise en œuvre et interviennent sur les différentes étapes de la chaîne d'innovation. Ils valorisent ainsi davantage les atouts dont dispose le pays. En effet, le développement à grande échelle des énergies renouvelables et la prise en charge de la problématique de l'efficacité énergétique exigent un encadrement de qualité en ressources humaines à la hauteur des objectifs et des ambitions du programme EnR.

Outre les centres de recherche affiliés aux entreprises comme le CREDEG, filiale du Groupe **Sonelgaz**, le secteur de l'énergie et des mines compte une agence de promotion et de rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APRUE) et une société spécialisée dans le développement des énergies nouvelles et renouvelables (NEAL). Ces organismes coopèrent avec des centres de recherche attachés au ministère de la recherche scientifique parmi lesquels figurent le CDER et l'UDTS. Le CDER, centre de développement des énergies renouvelables, est chargé d'élaborer et de mettre en œuvre les programmes de recherche et de développement, scientifiques et technologiques, des systèmes énergétiques exploitant l'énergie solaire, éolienne, géothermique et l'énergie de la biomasse.

*Ce document a été élaboré par le ministère de l'énergie et des mines  
Conception et réalisation SATINFO  
Société du Groupe Sonelgaz*

# Bibliographie

## Bibliographie

[1] **H. Ben Ahmed**, "Généralités sur l'énergie éolienne et convertisseurs associés Exemple du site de Ker Lann", *Travaux issus de l'équipe de Ker Lann du laboratoire SATIE, 2004.*

[2] **J TOUAL Belkacem**, " Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable", *mémoire de Magister En Electrotechnique de l'Université de BATNA, 2010.*

[3] **Yacine Abderrahmane BENCHERIF**, "Modélisation et commande d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la production de l'énergie éolienne", *mémoire d'Ingénieur d'État en Électrotechnique de l'Ecole Nationale Polytechnique, 1999.*

[4] **Boyette Armand**, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne", Thèse de doctorat, université de Henri Poincaré, Nancy, France, 2006.

[5] **S. Mekhtoub**, " Etude du Générateur Asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne", *mémoire d'Ingénieur d'État en Électrotechnique de l'Ecole Nationale Polytechnique, 2007.*

[6] **DOUADI TAREK**, " Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Génératrice Asynchrone ", *mémoire d'Ingénieur d'État en Électrotechnique de l'Université de BATNA.*

[7] **Naouel HAMDI**, " Modélisation et commande des génératrices éoliennes ", *Thèse de Magister, Université de Constantine, 2008.*

[8] **Lilia Abdelhamid**, " Contribution à l'Etude des Performances des Générateurs Electromagnétiques Utilisés dans les Systèmes Eoliens ",

*mémoire de Magister En Electrotechnique de l'Université de BATNA, 2008.*

**[9] DENDOUGA Abdelhakim,** " contrôle des puissances active et réactive de la machine à double alimentation (dfim)", *thèse de doctorat En Electrotechnique de l'Université de BATNA, 2010.*

**[10] Bruno SARENI,** "Méthodes D'optimisation Multimodales Associées A La Modélisation Numérique En Electromagnétisme", *thèse de doctorat de L'ECOLE CENTRALE DE LYON, 1999.*

**[11] Randy L. Haupt and Sue Ellen Haupt,"** Practical Genetic Algorithms", *Seconde Edition, ISBN 0-471-45565-2 Copyright © 2004 John Wiley & Sons, Inc.*

**[12] H. Farhi,** " Contribution à la conception par optimisation d'un rotor d'une machine synchrone à aimants permanents par algorithme génétique", *Mémoire de fin d'études en Electrotechnique, université de Guelma, 2010.*

**[13] B. Multon,** "L'Energie Electrique : Analyse des Ressources et de la Production", *Journées Electrotechniques, Organisées par le Club EEA, Paris, France, Janvier 1999.*

**[14] Beboit Robyns,** "Commande vectorielle de la machine asynchrone", *Electrotechnique, Edition TECHNIP, collection dirigée par Pierre Borne, paris, France, 2007.*