

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



**UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI-BEL-ABBES**  
**Faculté de Génie Electrique**  
**Département d'Electrotechnique**



Thèse présentée par :

**FEZAZI Omar**

Pour l'obtention du diplôme de :

**Doctorat 3<sup>ème</sup> Cycle : Electrotechnique :**  
**Réseaux électriques/Commande des actionneurs électriques**  
*Option : Commande des actionneurs électriques*

Intitulé de la thèse :

***Commande prédictive d'une machine asynchrone doublement alimentée  
dédiée pour les énergies renouvelables***

*Présentée devant le jury composé de :*

**Mr.BENTAALLAH Abderrahim**  
**Mr.MASSOUM Ahmed**  
**Mr.SEMMAH Abdelhafid**  
**Mr.TALEB Rachid.**

MCA (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)  
Professeur (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)  
MC A (U.D.L. Sidi Bel-Abbès)  
MCA (Univ-Chlef)

Président  
Rapporteur  
Examinateur  
Examinateur

$P$  : puissance (kW)

$D$  : diamètre en (m)

$n$  : vitesse de rotation (tr/min)

$f_1$  : fréquence au stator (Hz)

$f_2$  : fréquence au rotor (Hz)

$g$  : le glissement

$n_s$  : vitesse de synchronisme (tr/min)

$E_s, E_r$  : source de tension (volt)

$P_m$  : puissance mécanique (W)

$P_r$  : la puissance électrique fournie par le rotor (W)

$P_j$  : la puissance dissipée dans la résistance du rotor par effet Joule (W)

$V_{vent}$  : vitesse de vent (m/s)

$\hat{V}_{vent}$  : vitesse de vent estimer (m/s)

$m_1$  : La masse d'air en amont de l'éolienne (kg)

$\rho$  : Masse volumique de l'air en température ambiante (15°C) (Kg/m<sup>3</sup>)

$V_1$  : la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur (m/s)

$V_2$  : la vitesse du vent en aval de l'aérogénérateur (m/s)

$S_1$  : section en amont du tube d'air et par  $S$  la surface balayée par l'hélice (m<sup>2</sup>)

$S_2$  : section en aval du tube d'air et par  $S$  la surface balayée par l'hélice (m<sup>2</sup>)

$E_1$  : L'énergie cinétique contenue en amont de l'éolienne (joule)

$E_2$  : L'énergie cinétique contenue en amont de l'éolienne (joule)

$E_r$  : l'énergie mécanique transformé par l'hélice (joule)

$M$  : la masse d'air franchit le rotor de l'éolienne (Kg)

$C_p$  : coefficient de puissance

$C_{p-max}$  : coefficient de puissance maximum

$\lambda$  : la vitesse relative

$\lambda_{opt}$  : le ratio de vitesse optimal

$E_c$  : l'énergie cinétique (joule)

$P_v$  : la puissance instantanée fournie (W)

$P_t$  : la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine (W)

## NOMENCLATURE

---

$\Omega_t$  : la vitesse mécanique de l'arbre de la turbine (rad/s)

$\hat{\Omega}_t$  : la vitesse mécanique estimer de l'arbre de la turbine (rad/s)

R : rayon des pales (m)

$C_t$  : couple mécanique à la sortie de la turbine (N.m)

$\hat{C}_t$  : couple mécanique à la sortie de la turbine estimer (N.m)

$C_c$  : le coefficient du couple

$C_c^{\max}$  : le coefficient de puissance maximum

$J_t$  : Le moment d'inertie de la turbine (Kg.m<sup>2</sup>)

$J_g$  : Le moment d'inertie de la génératrice (Kg.m<sup>2</sup>)

J : l'inertie totale de l'ensemble « turbine + génératrice » (Kg.m<sup>2</sup>)

$f_v$  : Le coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice (N.m.s/rd)

$C_g$  : Le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice après multiplicateur (N.m)

$\Omega_g$  : La vitesse de rotation de la génératrice (rad/s)

$\Omega_g^*$  : vitesse de référence de la génératrice (rad/s)

$\Omega_t^*$  : vitesse de référence de la turbine (rad/s)

G : Le gain du multiplicateur de vitesse.

$\delta$  : L'angle du vent relatif (deg)

$\beta$  : angles de calage (deg)

$\beta_{opt}$  : angles de calage optimal (deg)

$C_{em}$  : le couple électromagnétique de la génératrice (N.m)

$C_{em}^*$  le couple électromagnétique de référence de la GADA (N.m)

$V_n$  : la vitesse nominal de la turbine (tr/min)

$V_d$  : la vitesse du démarrage minimale de l'éolienne (tr/min)

$C_x$  : Coefficient de traînée

$C_z$  : Coefficient de portance

$\alpha$  : l'angle d'incidence (deg)

$R_\Omega$  : le régulateur de vitesse de la génératrice ( $\Omega$ )

$[\Phi_s]_{3 \times 1} = [\varphi_{sa}, \varphi_{sb}, \varphi_{sc}]^T$  : Vecteur des flux instantanés des phases a, b et c statoriques (Wb)

$[\Phi_r]_{3 \times 1} = [\varphi_{ra}, \varphi_{rb}, \varphi_{rc}]^T$  : Vecteur des flux instantanés des phases a, b et c rotoriques (Wb)

$[I_s]_{3 \times 1} = [i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}]^T$  : Vecteur des courants instantanés des phases a, b et c statoriques ;

## NOMENCLATURE

---

$[\mathbf{I}_r]_{3 \times 1} = [i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}]^T$  : Vecteur des courants instantanés des phases a, b et c rotoriques (A)

$L_s, L_r$  : Les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la MADA respectivement (H)

$L_m$  : L'inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor (inductance magnétisante) (H)

$l_s, l_r$  : Les inductances propres statoriques et rotoriques (H)

$m_s, m_r$  : Les inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques de la MADA, respectivement (H)

$m_{sr}, m_{rs}$  : Les inductances mutuelles entre deux phases statorique-rotorique, et entre deux phases rotorique-statorique de la MADA, respectivement (H)

$M$  : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique (H)

$\theta$  : L'angle électrique entre une phase statorique et une autre rotorique (deg)

$R_s, R_r$  : La résistance des enroulements statorique et rotorique ( $\Omega$ )

$V_s$  : tension statorique (V)

$V_r$  : tension rotorique

$[P(\theta)], [P(\theta)]^{-1}$  : la transformée et l'inverse de la transformée de Park

$\theta_r$  : l'angle électrique rotorique (deg)

$\theta_s$  : l'angle électrique statorique (deg)

$\theta_{sr}$  : l'angle électrique de glissement (deg)

$\omega_r$  : vitesses de pulsation rotorique (rad/s)

$\omega_s$  : vitesses de pulsation statorique (rad/s)

$\omega_{sr}$  : vitesses de pulsation du glissement (rad/s)

$p$  : le nombre de paires de pôles de la GADA.

$v_{sd}, v_{sq}$  : les tensions statoriques dans le repère d,q (V)

$v_{rd}, v_{rq}$  : les tensions rotoriques dans le repère d,q (V)

$\varphi_{sd}, \varphi_{sq}$  : les flux statoriques dans le repère d,q (Wb)

$\varphi_{rd}, \varphi_{rq}$  : les flux rotoriques dans le repère d,q (Wb)

$i_{sd}, i_{sq}$  : les courants statoriques dans le repère d,q (A)

$i_{rd}, i_{rq}$  : les courants rotoriques dans le repère d,q (A)

$P_s, Q_s$  : Les puissances actives et réactives statoriques (W) (VAR)

$P_r, Q_r$  : Les puissances actives et réactives rotoriques (W) (VAR)

## NOMENCLATURE

---

$\sigma$  : coefficient de dispersion de Blondel

$\omega_{n,1}, \xi_1$  : la pulsation naturelle et un coefficient d'amortissement

$u(k)$  : l'entrée du modèle

$y(k)$  : la sortie du modèle

$\xi(k)$  : le bruit blanc centré

$q^{-1}$  : l'opérateur retard

$d$  : le délai introduit par le système

$A(q^{-1}), B(q^{-1}), C(q^{-1}), S(q^{-1}), R(q^{-1}), T(q^{-1})$  : polynômes

$J_{GPC}$  : fonction de coût

$J_{Ps}, J_{Qs}$  : fonction de coût des deux puissances active et réactive

$N_1$  : horizon de prédiction minimal ;

$N_2$  : horizon de prédiction maximal ;

$N_u$  : horizon de prédiction sur la commande ;

$\lambda$  : coefficient de pondération sur la commande.

$F_j, G_j, H_j, J_j$  : les polynômes de la solutions uniques des équations Diophantine

$P_{sref}, Q_{sref}$  : les matrices de puissances de reference active et reactive (W) (VAR)

$e$  : l'erreur entre la consigne et la sortie

$\delta_R$  : l'erreur gradient

$p_R$  : entrée du réseau de neurone

$w_{R1}$  : poids du réseau de neurone

$b_R$  : biais du réseau de neurone

# SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	01
<b>CHAPITRE : 01 LES ENERGIES RENOUVELABLES</b>	04
1 INTRODUCTION	04
2 LES DIFFERENTES FORMES D'ENERGIES RENOUVELABLES	05
2.1 La biomasse	05
2.2 La géothermie	07
2.3 Energie hydraulique – hydroélectricité	10
2.4 Energie solaire	12
3 L'ENERGIE EOLIENNE	19
3.1 Comment se produit le vent	20
3.2 Un aérogénérateur (l'éolienne)	21
3.3 Historique de l'éolienne	21
3.4 L'énergie éolienne au monde	22
3.5 L'énergie éolienne en Algérie	24
3.6 Les différents types d'un système éolien	26
4 CONCLUSION	29
<b>CHAPITRE : 02 L'aérogénérateur constitution mécanique et électrique</b>	30
1 INTRODUCTION	30
2 CONSTITUANTS MECANIQUES DE L'EOLIENNE	30
2.1 Les fondations	30
2.2 Le mat ou le pylône support	32
2.3 La nacelle	34
3 LES CONSTITUANTS ELECTRIQUES DE L'EOLIENNE ET LEURS FONCTIONS RESPECTIVES	42
3.1 Les moteurs électriques	42
3.2 La génératrice	43
4 LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION (MADA)	46
4.1 Application da la MADA en moteur	47
4.2 Application da la MADA en génératrice	49
5 AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ENERGIE EOLIENNE	51
5.1 Avantages	51
5.2 Inconvénient	52
6 CONCLUTION	53
<b>CHAPITRE : 03 Modélisation de l'aérogénérateur partie mécanique et électrique</b>	55
1 INTRODUCTION	55
2 MODELE DU VENT	56
3 MODELISATION DE LA TURBINE EOLIENNE	58
3.1 L'énergie disponible dans le vent (théorie de BETZ)	58
3.2 modèle aérodynamique des pales	61
3.3 Modèle de la partie mécanique	63
4 STRATEGIE DE COMMANDE DE LA TURBINE EOLIENNE	64
4.1 Extraction du maximum de la puissance du vent	64
4.2 Régulation du système à calage "pitch control"	66
4.3 Stratégie de maximisation de puissance "MPPT"	67
4.4 Résultat de simulation	72
5 MODELISATION DE LA MADA	77
5.1 Hypothèse simplificatrices	77
5.2 Modèle de la MADA dans le repère triphasé	78
5.3 Modèle de la MADA dans le repère biphasé	80

6	MODELISATION DE L'ONDULEUR	87
6.1	Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI)	89
7	RESULTAT DE SIMULATION	91
8	CONCLUSION	93
	<b>CHAPITRE : 04 Commande vectorielle de la GADA</b>	94
1	INTRODUCTION	94
2	STRATEGIE DE COMMANDE DE LA GADA	95
3	COMMANDE VECTORIELLE DIRECTE DES PUISSANCES	97
4	COMMANDE VECTORIELLE INDIRECTE DES PUISSANCES	98
5	RESULTATS DE SIMULATION	101
5.1	Réponse des puissances	101
5.2	Réponse des courants statorique et rotorique	107
5.3	Test de robustesse	111
6	CONCLUSION	113
	<b>CHAPITRE : 05 Commande predictive de la GADA</b>	114
1	INTRODUCTION	114
2	HISTORIQUE DE LA COMMANDE PREDICTIVE	115
3	MODE DE FONCTIONNEMENT DE LA COMMANDE PREDICTIVE	116
4	ALGORITHME DE LA COMMANDE GPC	118
4.1	Modèle de prédiction	119
4.2	Fonction de cout	121
4.3	Structure du prédicteur optimal sous forme matricielle	122
4.4	Critère quadratique matriciel	124
4.5	Minimisation de la fonction de cout	125
5	STRUCTURE RST DU REGULATEUR	125
5.1	Fonction de transfert en boucle fermée	126
6	CHOIX ET INFLUENCE DES PARAMETRES DE REGLAGE	129
6.1	Choix et influence de l'horizon initial N1	129
6.2	Choix influence de l'horizon final N2	130
6.3	Choix influence de l'horizon de commande Nu	130
6.4	Influence de $\lambda$	131
7	COMMANDE PREDICTIVE DE LA MADA	131
7.1	Résultat de simulation	132
8	CONCLUSION	137
	<b>CHAPITRE : 06 Commande adaptative avec modèle de référence de la GADA</b>	138
1	INTRODUCTION	138
2	HISTORIQUE DE LA COMMANDE ADAPTATIVE	139
3	MODE DE FONCTIONNEMENT DE LA COMMANDE ADAPTATIVE	140
4	TECHNIQUES DE LA COMMANDE ADAPTATIVE	141
4.1	Commande auto-ajustable et commande adaptative a modèle de référence	143
4.2	Commande adaptative prédictive directe et indirecte	146
5	COMMANDE ADAPTATIVE AVEC MODEL DE REFERENCE	148
5.1	Algorithme de la commande adaptative avec model de référence	148
5.2	Implémentation de la commande MRAS sur la MADA	151
5.3	Résultats de simulation	151
6	CONCLUSION	156
	<b>CHAPITRE : 07 Amélioration des performances de commande vectorielle de la GADA par les réseaux de Neurones artificiels</b>	157
1	INTRODUCTION	157
2	HISTORIQUE	157
3	LES NEURONES BIOLOGIQUE	161
4	NEURONE FORMEL	163

4.1	Modèle de neurone	165
4.2	Architecture de réseau	169
4.3	Apprentissage	173
4.4	Exemple de calcul	174
5	AMELIORATION DES PERFORMANCES DE COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA PAR LES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS	177
5.1	Résultats de simulation	177
6	CONCLUSION	180
	CONCLUSION GENERALE	181

## INTRODUCTION GENERALE

Face à la demande croissante de l'énergie électrique et pour des raisons écologiques (échauffement planétaire, déchets nucléaires, problème de couche d'ozone) et la diminution du stock mondial en hydrocarbure et l'augmentation des prix de cette dernière, La recherche est actuellement orientée vers des nouvelles techniques de production électrique telle que la production électrique par les énergies renouvelables comme l'énergie solaire et éolienne.

L'exploitation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité compte parmi les technologies d'énergies renouvelables les plus largement développées et les plus utilisées et connaît un essor dans de nombreux pays. En raison de la baisse continue des coûts de production et de développement de projet due aux économies d'échelle, l'énergie éolienne devient rentable dans un nombre croissant de pays avec un taux de croissance annuel de 44%, avec un Total des installations cumulatives élèvent à 369,553 MW à la fin de 2014 [1].

Pour la production électrique par l'énergie éolienne plusieurs structures sont utilisées éolienne a axes vertical ou horizontal, et plusieurs méthodes sont proposer a vitesse fixes ou variable. Alors que pour le système de générateur les chercheurs en utiliser les différents machines électriques pour la conversion énergétique.

Mais dernièrement les chercheurs s'intéressent a la machine asynchrone double alimentation, une machine triphasée un peut particulière caractérisé par sont rotor bobiné alors elle peut être alimentée par deux sources distinctes branchées respectivement au stator et au rotor, cette propriété qui permet a cette machine de fonctionner en hypo-synchrone (au dessous de la vitesse de synchronisme) et hyper-synchrone (au dessus de la vitesse de synchronisme) alors une plage de vitesse variable  $\pm 30\%$  de la vitesse de synchronisme, ce qui place cette machine en bonne position pour l'utilisation dans le domaine éolien a cause de la variation de la vitesse du vent.

### Objectifs de la thèse

L'objectif principal de cette thèse est de continuer et améliorer la recherche dans le cadre de production par l'énergie éolienne et de développer des méthodes de commande robuste et optimale pour améliorer le rendement et la production de l'énergie électrique,

## INTRODUCTION GENERALE

---

alors on va étudier la commande prédictive et adaptative pour les appliquer sur la machine asynchrone double alimentation.

A la lumière de ce constat, ma thèse sera divisée en sept chapitres pour réaliser notre étude.

Dans le premier chapitre, on a présenté les différentes sources d'énergies renouvelables existantes la biomasse, la géothermie, énergie hydraulique (hydroélectricité), énergie solaire et l'énergie éolienne, le potentiel et le développement de chaque énergie à l'échelle mondiale et Algérien ensuite les solutions technologiques permettant d'exploiter ces ressources renouvelable.

Le deuxième chapitre est dédié à faire une étude théorique de chaque partie du système de conversion d'énergie éolienne alors on a expliquer la constitution de l'éolienne à axe vertical de la fondation, le mât et chaque partie de la nacelle, ensuite l'étude théorique de la partie génératrice et la machine asynchrone double alimentation, enfin les avantages et les inconvénients de cette énergie.

Le troisième chapitre est fait en deux partie la première partie est consacré à la modélisation de la partie mécanique (turbine) de notre éolienne avec deux méthodes stratégiques pour maximiser la puissance du vent, le contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation avec une régulation classique PI et contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation. Ensuite en second partie est la modélisation de la partie électrique de notre système de conversion constitué de la machine asynchrone double alimentation (MADA) alimentée avec un onduleur deux niveaux coté rotor.

Dans le quatrième chapitre on s'intéresse à la commande vectorielle avec orientation du flux statorique direct et indirect pour pouvoir contrôler indépendamment les puissances active et réactive produites par le stator de notre GADA, en utilisant les régulateurs classiques de type Proportionnel-Intégral (PI). Ensuite une étude comparative entre deux méthodes en termes de suivi des consignes, de sensibilité aux perturbations et de robustesse vis-à-vis les variations paramétriques de la MADA.

On propose dans le cinquième chapitre la commande prédictive une commande non linéaire connue par ça robustesse. La commande prédictive est une technique de commande avancée de l'automatique caractérisée par le prévoir de la valeur que devrait prendre le signal de sortie alors les puissances active et réactive du système de déduire la commande conduisant à ces valeurs ou utiliser un modèle dynamique du système à l'intérieur du contrôleur en temps réel afin d'anticiper le futur comportement du système pour contrôler notre génératrice ensuite une étude des performance de cette commande en thème suivie des consigne robustesse contre les changement paramétrique et qualité de courant.

Le sixième chapitre est consacré à l'étude d'une autre commande populaire et robuste: la commande adaptative avec model de référence. Cette commande a la propriété de forcer la

## INTRODUCTION GENERALE

---

réponse de notre machine est suivre un modèle bien déterminée appelé le modèle de référence. Après l'utilisation de cette commande sur notre système une étude comparative entre les réponses de la commande prédictive et la commande vectorielle est développée.

Le dernier chapitre a pour but d'améliorer la commande vectorielle par régulation PI pour atteindre les performances de la commande prédictive et adaptative avec modèle de référence, pour cela on va utiliser les réseaux de neurones inspirés du fonctionnement des neurones biologiques placés d'une part dans la famille des applications statistiques et d'autre part dans la famille des méthodes de l'intelligence artificielle généralement optimisés par des méthodes d'apprentissage de type probabiliste, on a remplacé le régulateur PI par un contrôleur neuronal, enfin les réponses seront présentées et évaluées par rapport aux réponses de la GPC et la MRAS.

Finalement, on termine notre thèse par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et expose quelques perspectives de recherche envisagées.

# CHAPITRE I

## LES ENERGIES RENOUVELABLES

### 1. INTRODUCTION

Les énergies renouvelables (ENR) « sources d'énergie renouvelables » ou « énergies d'origine renouvelable » sont des sources d'énergies dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle de temps humaine. La différence entre les énergies renouvelables et les autres énergies ce qu'elle n'est pas polluante. Alors plusieurs associations sont pays cherchent à développer et utiliser ces énergies pour lutter contre l'effet de serre et les rejets de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Ce sont les énergies de l'avenir. Aujourd'hui elles dominent 20 % de la consommation mondiale d'électricité [1][8]. Il existe cinq différentes énergies : Le bois énergie ou biomasse solide, la géothermie, énergie solaire, énergie solaire, l'hydraulique, énergie éolienne.

Le Soleil est la principale source des différentes formes d'énergies renouvelables : son rayonnement est le vecteur de transport de l'énergie utilisable (directement ou indirectement) lors de la photosynthèse, ou lors du cycle de l'eau (qui permet l'hydroélectricité) et l'énergie des vagues (énergie marine), la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans (énergie thermique des mers) ou encore la diffusion ionique provoquée par l'arrivée d'eau douce dans l'eau de mer (énergie osmotique). Cette énergie solaire alliée à la rotation de la Terre est à l'origine des vents (énergie éolienne) et des courants marins (énergie hydrolienne).

La chaleur interne de la Terre (géothermie) est assimilée à une forme d'énergie renouvelable, et le système Terre-Lune engendre les marées des océans et des mers permettant la mise en valeur de l'énergie marémotrice.



Fig.1 Différent type des énergies renouvelables [1]

## 2. LES DIFFERENTES FORMES D'ENERGIES RENOUVELABLES

### 2.1. LA BIOMASSE

Indirectement, il s'agit d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse. Elle est exploitée par combustion ou métabolisation. Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites, Ce sont tous des matériaux d'origine biologique employés comme combustibles pour la production de chaleur, d'électricité ou de carburants ; On peut citer notamment le bois et les biocarburants.

Jusqu'au 18<sup>e</sup> siècle, la biomasse était la principale ressource énergétique utilisée par l'homme, en particulier sous forme de bois ; même aujourd'hui, selon l'Agence internationale de l'énergie, la biomasse et les déchets fournissent 10 % de l'énergie primaire produite dans le monde, sur 13,3 % d'énergies renouvelables [2] [8]. Mais cette ressource produit de nombreux polluants et a l'inconvénient majeur d'exiger des surfaces considérables pour sa production.

#### 2.1.1. Le bois énergie ou biomasse solide

La biomasse solide représente les matériaux d'origine biologique qui peuvent être employés comme combustible pour la production de chaleur ou d'électricité. Ce sont principalement les ressources ligneuses (à base de lignine) d'origine forestière, agricole ou urbaine, aussi appelées bois-énergie : le bois bûche, les granulés de bois, les déchets de bois sous forme de plaquette ou de sciure... Ce sont aussi les matières organiques telles que la paille, les résidus de récoltes et les matières animales. Enfin, les liqueurs noires, issues de l'industrie papetière, et les déchets urbains solides renouvelables sont aussi considérés comme biomasse solide.

### 2.1.2. Evolution de la production biomasse dans le monde (TWh)

Quelques chiffres autour de la biomasse :

- Seconde énergie renouvelable dans le monde
- 1 tonne de bois utilisé comme source d'énergie; c'est 1 tonne de CO<sub>2</sub> d'origine fossile en moins dans l'atmosphère.
- Sans compter les biocarburants, la biomasse est utilisée à 96% pour produire de la chaleur.

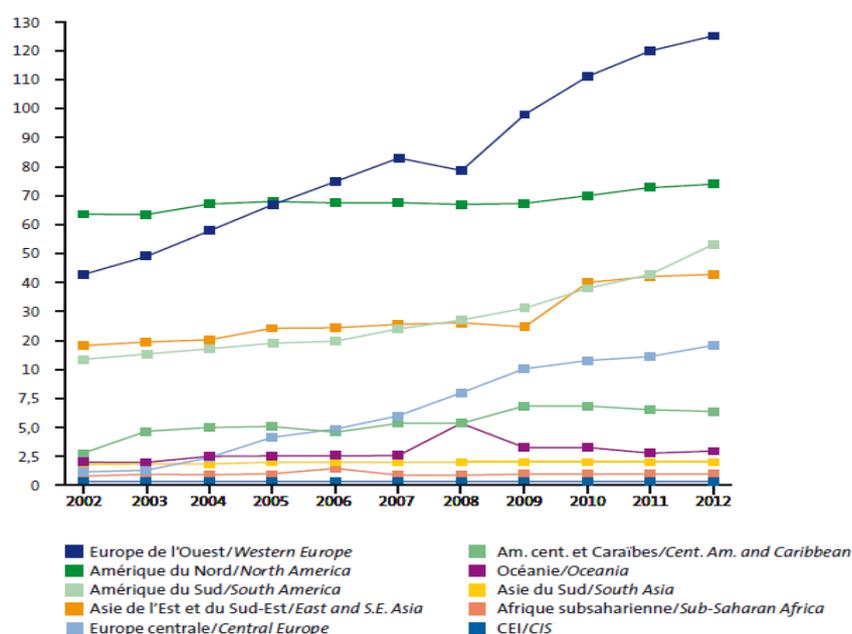


Fig.2 Evolution de la production biomasse dans le monde [1]

### 2.1.3. Les inconvénients de la biomasse

- Leur rendement énergétique est assez faible.
- Pour produire de l'énergie biomasse il faut occuper des terres arables et donc baisser la production agricole.
- Dégage du CO<sub>2</sub>
- Une surexploitation de la biomasse peut entraîner une déforestation importante et donc un danger pour l'environnement.
- Provoque la pollution des eaux et des sols
- Les coûts et les impacts du transport pour amener le bois là où la ressource manque.

## 2.2. LA GEOTHERMIE

La géothermie est l'exploitation de la chaleur stockée dans le sous-sol. L'utilisation des ressources géothermales se décompose en deux grandes familles : la production d'électricité et la production de chaleur. En fonction de la ressource, de la technique utilisée et des besoins, les applications sont multiples. Le critère qui sert de guide pour bien cerner la filière est la température. Ainsi, la géothermie est qualifiée de « haute énergie » (plus de 150°C), « moyenne énergie » (90 à 150°C), « basse énergie » (30 à 90°C) et « très basse énergie » (moins de 30°C) [1] [3].

### 2.2.1. Classification de la géothermie

#### a) La géothermie très basse énergie

S'applique aux nappes d'une profondeur inférieure à 100 m et à faible niveau de température (moins de 30°C). La chaleur extraite est utilisée généralement pour assurer le chauffage et le rafraîchissement des locaux après élévation de la température au moyen d'une pompe à chaleur.

#### b) La géothermie basse énergie

Appelée aussi basse température ou basse enthalpie, explore des aquifères situés entre 1 500 et 2 500 mètres de profondeur. La température atteint entre 30°C et 90°C : trop faible pour produire de l'électricité mais idéal pour produire de la chaleur. Les applications vont du chauffage urbain au thermalisme, en passant par le chauffage des serres et le séchage des produits agricoles.

#### c) La géothermie moyenne énergie

Aussi appelée moyenne enthalpie, explore le plus souvent des gisements d'eau chaude ou de vapeur humide compris entre 90 et 150°C. Dans les bassins sédimentaires, il faut atteindre des profondeurs de 2 000 à 4 000 mètres pour obtenir ces températures. Dans des zones plus propices, la géothermie moyenne énergie pourra être exploitée à moins de 1 000 mètres. Cette voie est utilisée pour produire de la chaleur, valorisée notamment dans des processus industriels, et éventuellement de l'électricité.

#### d) La géothermie haute température

Ou haute enthalpie, exploite des fluides atteignant des températures supérieures à 150°C, pour produire de l'électricité. Les réservoirs sont localisés entre 1 500 à 3 000 mètres de profondeur, généralement dans les zones de volcanisme ou de tectonique active.

#### e) La géothermie profonde assistée

Est une voie de recherche qui consiste à extraire la chaleur des roches chaudes fissurées situées entre 3 et 5 kilomètres de profondeur. Contrairement à la géothermie haute température classique qui exploite des réservoirs capables de fournir des débits de fluides élevés, la géothermie profonde assistée nécessite de stimuler les roches peu perméables en injectant de l'eau sous forte pression dans le sol [8].

### *2.2.2. La géothermie pour produire de la chaleur*

La géothermie très basse et basse énergie utilise l'énergie du sous-sol pour produire de la chaleur, soit de façon indirecte grâce à des pompes à chaleur pour élever le niveau de température (géothermie très basse énergie), soit de façon directe (géothermie à basse énergie).

### *2.2.3. La géothermie pour la climatisation*

Si une pompe à chaleur est un réfrigérateur à l'envers, une pompe à chaleur à l'envers est...un réfrigérateur ! La géothermie peut donc assurer non seulement la production de chaleur en hiver, mais aussi la production de froid en été. On parle alors de pompe à chaleur réversible : elle est équipée d'un dispositif permettant d'inverser le cycle du fluide frigorigène. Le condenseur devient l'évaporateur, l'évaporateur devient condenseur et la pompe à chaleur puise alors des calories dans le bâtiment pour les rejeter dans le sol... La maison est climatisée !

### *2.2.4. La climatisation géothermique: une solution adaptée à l'Algérie*

Dans le cadre d'un programme de promotion des énergies propres et renouvelables de la direction de l'environnement de la wilaya de Saïda, un système de climatisation géothermique a été mis en place à l'école primaire Si Ben Salah, située à Sidi Aïssa commune de Sidi Amar Daïra de Sidi Boubeker. L'intervention du Centre de Développement des Energies Renouvelables consiste en l'étude de l'efficacité énergétique de cette installation qui est destinée à la climatisation de la cantine de l'école [4].

Cette installation, qui est alimentée à partir d'une source géothermale dont la température est de 46°C avec un débit de 25 m<sup>3</sup> /h, est composée de trois systèmes

- Un système de récupération de la chaleur géothermique
- Un système de ventilo-convecteur constitué de deux circuits d'eau et d'un circuit d'air pour le chauffage de la cantine en saison hivernale et la climatisation. Le circuit d'air est constitué d'une gaine d'aspiration et de deux gaines de refoulement

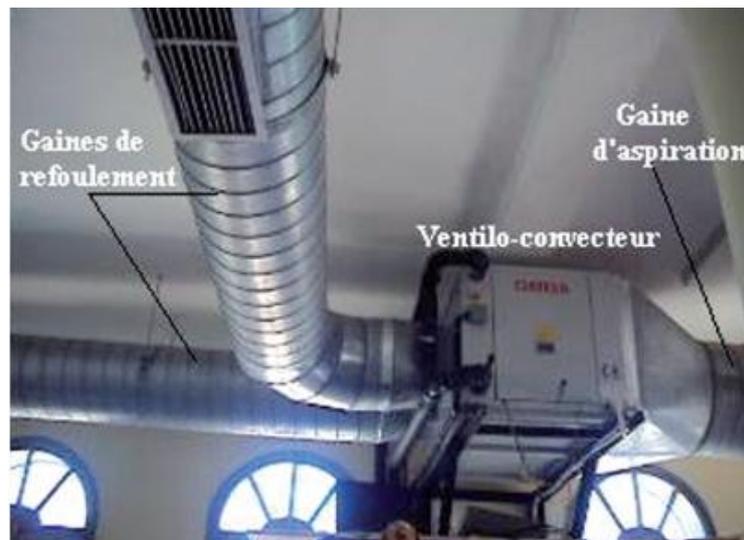


Fig.3 Essai sur le ventilo-convecteur dans la salle de cantine

- Une pompe à chaleur air-eau qui assure la climatisation durant toute l'année Son fonctionnement est autonome et peut servir d'appui au chauffage en cas de panne du système de récupération de la chaleur géothermique ou si la température du puits est insuffisante, ... Des essais ont été effectués sur différentes parties de l'installation. Cette étude a conduit à des résultats très concluants quand à l'utilisation des eaux géothermales pour la climatisation [4].

#### 2.2.5. La géothermie pour produire de l'électricité

Il y a deux méthodes pour produire de l'électricité grâce à la chaleur du sous-sol : par la géothermie naturelle à haute énergie (exploitation de l'eau chaude présente dans le sous-sol à haute température) et par le système géothermique stimulé (injection d'eau dans des roches chaudes fracturées).

La chaleur terrestre n'est pas exploitable partout de la même façon. Dans les zones volcaniques, à la frontière des plaques lithosphériques, la chaleur du centre de la Terre remonte et réchauffe de gigantesques poches d'eau.

L'eau est alors présente dans le sous-sol sous forme liquide ou sous forme de vapeur. Cette vapeur va permettre de faire tourner une turbine, qui, accouplée d'un alternateur, produira de l'électricité.

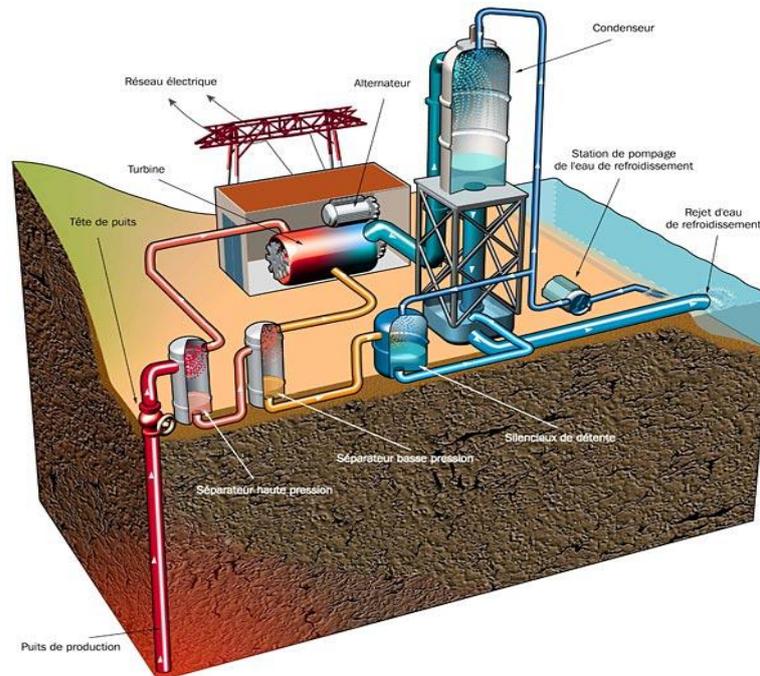


Fig.4 Principe de fonctionnement de la centrale électrique géothermique de Bouillante

### 2.2.6. La géothermie en Algérie

Les études montrent que le Nord de l'Algérie compte un nombre important de sources thermales. Près de 200 sources ont été inventoriées et elles sont réparties à travers tout le territoire Nord Algérien, majoritaires au Nord-est. Parmi les plus importantes, nous pouvons citer Hammam Meskoutine (98 °C) à Guelma, Hammam Boutaleb (52 °C) à Sétif et Hammam Bouhanifia (66 °C) à Mascara [5] [8].

En plus des nombreuses sources thermales dans le Nord du pays, il existe dans le Sud algérien et plus exactement dans le Sahara septentrional, une importante réserve en eau thermique qui est la nappe du continental intercalaire

Le Sahara algérien présente dans son ensemble un gradient géothermique moyen de l'ordre de 4 °C / 100 m. Deux parties distinctes sont bien mises en évidence à travers la carte de gradient géothermique. L'une dans la partie septentrionale du Sahara, dont le gradient géothermique moyen est de l'ordre de 3 °C/100 m. L'autre dans le Sahara occidental, qui présente un fort gradient géothermique qui atteint plus de 6 °C/100 m, plus particulièrement dans les régions de Béchar, Beni Abbès et Timimoun [5].

### 2.3. ENERGIE HYDRAULIQUE – HYDROELECTRICITE

L'hydroélectricité prend sa place dans un mix de production diversifié combinant toutes les énergies : nucléaire, thermique à flamme (charbon, fioul, gaz naturel) et

énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolien, bio-masse). Sa souplesse de fonctionnement et sa rapidité d'utilisation lui confèrent une place privilégiée dans les parcs de production, comme base de la production d'électricité ou comme moyen d'ajustement lors des pics de consommation en électricité. Avec des coûts de production très bas.

L'hydraulique est une des premières énergies domestiquée par l'homme (moulins au fil de l'eau, bateaux à aubes,...). L'hydroélectricité, c'est-à-dire la production d'électricité à partir de la force de l'eau, est apparue au milieu du XIXe siècle. Appelée la "houille blanche", elle a été synonyme d'un développement économique très importants [9].

### 2.3.1. L'hydroélectricité, comment ça marche ?

Comme les ancestrales roues à aubes, les turbines des centrales hydro-électriques sont activées par la force de l'eau.

Ces turbines entraînent des alternateurs qui produisent alors l'électricité. Par l'intermédiaire d'un transformateur, l'électricité produite est ensuite évacuée vers le réseau électrique.

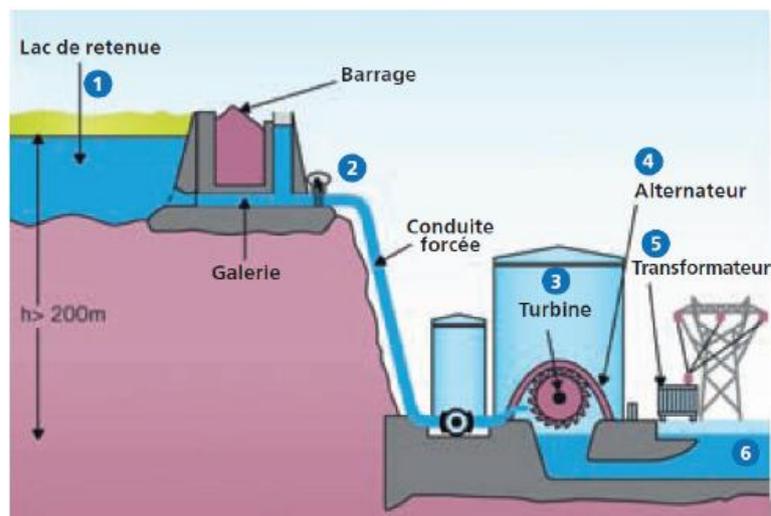


Fig.5 Principe de fonctionnement de la centrale électrique hydraulique [9]

L'hydroélectricité est produite dans des usines appelées centrales hydrauliques, qui fonctionnent le plus souvent en association avec un barrage, en dérivant l'écoulement naturel de l'eau.

### 2.3.2. Les plus grandes centrales hydrauliques

Voici les plus grandes centrales hydrauliques mondiales [1]

Installation	Pays	Énergie produite annuellement (TWh)	Puissance installée(MW)
Barrage des Trois-Gorges	Chine	92,2	22 500
Barrage d'Itaipu	Brésil Paraguay	98,63	14 000
Barrage de Xiluodu	Chine	57,1	13 860
Barrage de Guri	Venezuela	47 (en moyenne)	10 235

Tab.1 Les plus grandes centrales hydrauliques mondiales

### 2.3.3. Parc de production hydroélectrique en Algérie

Voici les centrales hydrauliques et leur puissance en Algérie installée [6]

Centrale	Puissance installée MW	Centrale	Puissance installée MW
Darguina	71.5	GHRIB	7.000
Ighil Emda	24	GOURIET	6.425
Mansouria	100	BOUHANIFIA	5.700
Erraguene	16	OUED FODDA	15.600
Soukel DJEMAA	8.085	BENI BEHDE	3.500
Tizi MEDEN	4.458	TESSALA	4.228

Tab.2 Les plus grandes centrales hydrauliques en Algérie

## 2.4. ENERGIE SOLAIRE

La production d'électricité solaire repose sur deux technologies bien distinctes. La technologie des modules photovoltaïques utilise des propriétés des semi-conducteurs. La seconde technologie est celle des centrales hélios thermodynamiques ou centrales solaires thermique.

### 2.4.1. Energie solaire thermique

*a) La solaire thermique basse température*

Les rayons du soleil+ des capteurs thermiques, transmettent leur énergie à des absorbeurs métalliques - lesquels réchauffent un réseau de tuyaux de cuivre où circule un fluide caloporteur.

Ce mode d'énergie est utilisé souvent dans tous les principaux chauffagistes, le chauffe-eau solaire au niveaux des maisons ou foyer. mais aussi alimenter un système ayant la double fonction de chauffage et de production d'eau chaude : le système solaire combiné (SSC), aussi appelé "combi". D'une façon générale, un chauffe-eau solaire couvre entre 40 et 80 % des besoins en eau chaude, et un SSC de 25 à 60 % des besoins en chauffage et en eau chaude [3], les différents types de ces systèmes :

- Le chauffe-eau solaire monobloc associe, sur un même châssis, capteur et ballon d'eau, ce qui le rend difficilement intégrable. Il fonctionne sur le principe du thermosiphon et, dénué d'électronique, il est d'une grande simplicité. Il est adapté aux faibles besoins d'eau chaude et à la toiture-terrasse. On l'installe beaucoup dans les pays chauds.
- Le chauffe-eau solaire en thermosiphon peut aussi être réalisé avec capteurs et ballon séparés. Son usage est, de fait, limité par les contraintes techniques. Il faut une différence de 15 °C entre les capteurs et le ballon pour que le fluide circule. Le ballon doit se trouver au-dessus des capteurs. Si le ballon est situé à l'extérieur, les performances du système sont réduites en hiver, à cause des déperditions de chaleur. Le chauffe-eau solaire à éléments séparés est le système le plus répandu en France. Il affiche une meilleure performance. Séparés, capteurs et ballon peuvent s'intégrer au mieux à la construction. Toutefois, la distance la plus courte entre les éléments est aussi la meilleure afin d'éviter les pertes de chaleur.

*b) La solaire thermique haute température*

La concentration optique des rayons du soleil permet d'obtenir de très hautes températures. Selon les différentes technologies de captage, la chaleur produite est généralement comprise entre 400 °C et 1 000 °C. On distingue deux usages principaux :

- la production de chaleur (thermique),
- la production d'électricité (thermodynamique).

Dans leur principe, les concentrateurs optiques superposent en un même point des rayons solaires collectés sur une surface de captage, le plus souvent formée de miroirs. Différentes géométries de concentrateurs ont été expérimentées. Ils sont dotés de dispositifs de suivi de la course du soleil, en hauteur ou en hauteur et en

azimut. Les systèmes solaires à concentration collectent uniquement le rayonnement solaire direct, alors que les capteurs solaires plans non concentrateurs et les modules photovoltaïques captent également le rayonnement diffus [1] [8].



*Fig.6 Exemple de la solaire thermique haute température*

Dans les centrales solaires à concentration, on peut produire de grandes quantités d'électricité. Cette filière, promue dans les années 1970, a été délaissée à la suite du contre-choc pétrolier de 1986. Aujourd'hui, elle intéresse à nouveau les industriels, les investisseurs et les compagnies électriques, car elle est source de kilowattheures propres et participe ainsi à la lutte contre l'effet de serre. En concentrant l'énergie solaire, on obtient une température très élevée qui permet de produire de la vapeur. En faisant tourner une turbine, la vapeur génère de l'électricité destinée au réseau électrique. C'est l'hélio thermodynamique, soit l'art de produire de l'électricité avec la chaleur du soleil [1] [8].

- Les fours solaires à concentration sont destinés à la recherche (chimie des matériaux, reconstitution de l'entrée d'objets dans l'atmosphère, etc.). Ils produisent uniquement de la chaleur haute température. Cette technique utilise un champ d'héliostats orientables et un grand miroir parabolique fixe, qui renvoie les rayons sur un récepteur. Le four solaire d'Odeillo, dans les Pyrénées-Orientales, concentre le soleil 10 000 fois. À Mont-Louis, non loin de là, un ancien four expérimental sert aujourd'hui à des démonstrations pédagogiques et à la cuisson de céramiques.

*c) Pays porte le développement de la filière [1] [8]*

- Les États-Unis, pays berceau de la filière, concentrent aujourd'hui quasiment toute la puissance héliothermodynamique installée dans le monde avec 355 MWe.

Quatre États américains sont particulièrement engagés dans le développement de nouveaux projets : le Nevada avec 64 MWe qui seront mis en service courant 2007 (sociétés Acciona et Solargenix), la Californie où 2 contrats ont été signés pour développer 800 MWe entre 2008 et 2011, l'Arizona et le Nouveau-Mexique.

- La renaissance de la filière est aussi désormais portée par l'Espagne, qui s'est fixé un objectif de 500 MWe pour 2010. Forte de l'expérience issue de ses premiers sites hélio-thermodynamiques localisés à Almeria, le pays a inauguré la première centrale commerciale à Séville en 2006 (PS10 avec 11 MWe). La prochaine est attendue pour 2008 en Grenade (Andasol 1 avec 50 MWe). Au total, plus de 1 500 MWe sont en projet [3].
- Du côté de l'Allemagne, plusieurs industriels et bureaux d'études travaillent sur des techniques destinées à être développées dans des pays du Sud : Schott a ouvert une usine de production pour équiper des centrales solaires en construction, Schlaich Bergermann und Partner (SBP) participe au développement du collecteur parabolique Eurodish, dont 7 exemplaires de 10 kW fonctionnent en Europe et en Inde.
- Une dizaine de projets de centrales hélio-thermodynamiques sont à l'étude ailleurs dans le monde : Mexique, Algérie, Iran, Afrique du Sud, Australie, Egypte, Maroc...

#### 2.4.2. *Energie solaire photovoltaïque*

L'énergie solaire photovoltaïque –provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité. Cette conversion se produit au sein de matériaux "semi-conducteurs", qui ont comme propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. Dans le cas du photovoltaïque, cette énergie est apportée par les photons, les composants de la lumière, qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant le courant électrique.

Les cellules photovoltaïques ont pour constituant de base les semi-conducteurs, dont le plus exploité est le silicium. Ce matériau est modifié par l'apport d'éléments extérieurs (en général des atomes de phosphore et de bore) pour le polariser et attirer les électrons dans un certain sens. Orientés de la sorte par le matériau "dopé", ils vont circuler et créer un courant électrique, lui-même recueilli par des fils métalliques très fins. Les cellules sont assemblées en modules. Les modules vont de micro-puissances de moins de 2 Wc à des capacités unitaires de 150 Wc, voire 300 Wc. Un module photovoltaïque coûte actuellement 2 € par watt crête à fabriquer.



Fig.7 panneaux solaire photovoltaïque

Les cellules les plus répandues sont issues de lingots de silicium cristallin, découpés en fines tranches. Lorsque le matériau est constitué d'un seul cristal, on parle de silicium monocristallin (aspect uniforme gris bleuté ou noir). Quand il est élaboré à partir de plusieurs cristaux assemblés, on l'appelle silicium poly-cristallin (généralement bleu, aspect d'une mosaïque). Les cellules issues du silicium monocristallin ont de meilleurs rendements que les autres, mais elles sont plus chères. Moins répandues, les cellules "en couches minces" sont fabriquées en déposant des couches très fines (quelques microns) de semi-conducteurs ou de matériaux photosensibles sur des supports bon marché comme le verre, le métal ou le plastique. Les cellules que l'on trouve, par exemple, dans les calculatrices sont en couches minces Les différentes installations photovoltaïques.

a) *Les installations sur site isolé*

Ce type de montage est adapté aux installations ne pouvant être raccordées au réseau l'énergie produite doit être directement consommée et/ou stockée dans des accumulateurs pour permettre de répondre à la totalité des besoins.

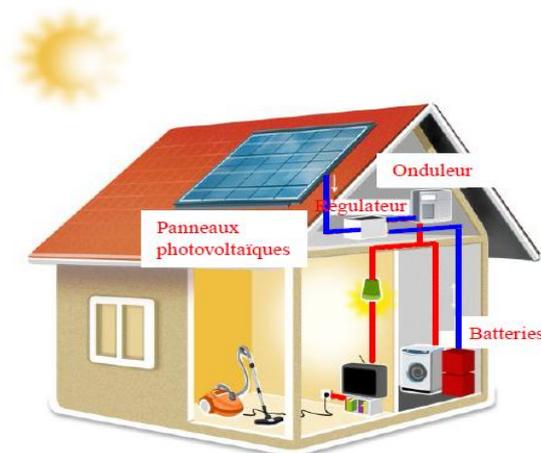


Fig.8 exemple Les installations sur site isolé

Les panneaux photovoltaïques produisent un courant électrique continu.

Le régulateur optimise la charge et la décharge de la batterie suivant sa capacité et assure sa protection. L'onduleur transforme le courant continu en alternatif pour alimenter les récepteur AC. Les batteries sont chargées de jour pour pouvoir alimenter la nuit ou les jours de mauvais temps. Des récepteurs DC spécifiques sont utilisables. Ces appareils sont particulièrement économes.

*b) Les installations raccordées au réseau de distribution public*

- Solution avec injection totale

Toute l'énergie électrique produite par les capteurs photovoltaïques est envoyée pour être revendue sur le réseau de distribution. Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en deux points :

Le raccordement du consommateur qui reste identique avec son compteur de consommation (on ne peut pas utiliser sa propre production),

Le nouveau branchement permettant d'injecter l'intégralité de la production dans le réseau, dispose de deux compteurs : l'un pour la production, et l'autre pour la non-consommation (permet de vérifier qu'aucun soutirage frauduleux n'est réalisé) [7].



*Fig.9 Exemple d'une installations raccordées au réseau injection totale*

- Solution avec injection de surplus

Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en un point : l'utilisateur consomme l'énergie qu'il produit avec le système solaire et l'excédent est injecté dans le réseau. Quand la production photovoltaïque est insuffisante, le

réseau fournit l'énergie nécessaire. Un seul compteur supplémentaire est ajouté au compteur existant [7].



Fig.10 Exemple d'une installations raccordées au réseau injection surplus

#### 2.4.3. Potentiel solaire en Algérie

La qualité du rayonnement solaire algérien permet à l'Algérie de se classer parmi les trois pays qui disposent des meilleurs gisements solaires dans le monde, Le potentiel solaire de l'Algérie, représentant dix fois la consommation mondiale en énergie, est à même d'assurer l'énergie nécessaire aux différentes applications industrielles, pour peu que les capacités technologiques dans ce domaine connaissent un accroissement significatif. Avec un ensoleillement annuel moyen évalué à 2.000 heures et un territoire composé à 86% de désert saharien, la puissance solaire de l'Algérie est estimée à environ 2.650 KWh/m<sup>2</sup>/an dans le sud, ce qui correspond à une capacité électrique 8 fois supérieure aux réserves de gaz naturel du pays, et au plus grand champ solaire du monde.

#### 2.4.4. Une centrale solaire photovoltaïque inaugurée à Ghardaïa

Le ministre de l'Énergie, Youcef Yousfi, a inauguré en 2014 à Oued N'chou (10 km au nord de la commune de Ghardaïa) une mini-centrale solaire pilote.

Réalisée sur une superficie de 10 hectares, pour un coût global de près de 900 millions de DA, cette mini-centrale, d'une puissance de 1,1 mégawatts (MW), est dotée de 6.000 panneaux photovoltaïques.

Fortement respectueux de l'environnement, ce projet permettra aussi de lancer une dynamique de promotion de la recherche spécialisée en matière de développement des énergies renouvelables et constituera un centre

d'expérimentation des nouvelles technologies en matière d'énergie solaire, a affirmé le ministre.

Cette mini-centrale constitue ainsi "un laboratoire naturel" pour les études et recherches en matière d'énergie solaire, mais également du matériel utilisé, afin de propager cette technologie à travers le territoire national.

Premier du genre dans la région, ce projet s'inscrit dans le cadre d'un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables en Algérie, qui vise l'installation d'une puissance d'origine renouvelable devant couvrir 40% de la consommation énergétique du pays à l'horizon 2030.

Accompagné du président du groupe Sonelgaz et du Président directeur général de l'entreprise NAFTAL, le ministre a, en outre, mis en service partiellement un raccordement au réseau de gaz naturel de 1.200 foyers dans le nouveau tissu urbain de Bouhraoua, à l'entrée nord de Ghardaïa [6] [8].



*Fig.11 Mini-centrale solaire à Ghardaïa*

### 3. L'ENERGIE EOLIENNE

L'humanité utilise le vent de puis la nuit des temps (bateau à voile, moulin à vents...). C'est certainement la forme d'énergie renouvelable qui connaît le plus fort développement les éoliennes ayant fait de gros progrès depuis une dizaine d'années (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). C'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif.

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée avec l'augmentation du prix du pétrole et du gaz, le coût de l'électricité issue des parcs éoliens devient de plus en plus compétitif. Les tarifs de l'éolien ne seront pas plus élevés que celui du kilowattheure des centrales à gaz optimisées. Autre source d'économie : la taille croissante des machines, qui en

réduit le nombre pour un site donné. L'expérience et de nouvelles techniques abaisseront sans doute encore les coûts. Sans oublier l'apparition possible de taxes sur les énergies polluantes, ce qui modifiera la situation... en donnant sans doute un nouveau souffle à l'éolien.

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. De plus, les éoliennes sont ainsi moins visibles et occasionnent moins de nuisances sonores.

### 3.1. COMMENT SE PRODUIT LE VENT

Le vent est en fait la résultante de plusieurs phénomènes qui engendrent différents types de forces, à l'origine de mouvements d'air. Pour être tout à fait rigoureux il y a même trois forces différentes, qui sont : les forces de pression la force de Coriolis et les forces de frottement.

La différence de température entre deux endroits sur terre crée une différence de pressions. Par conséquent l'air va bouger de l'endroit de haute pression vers l'endroit de faible pression .Le vent est ainsi créé.

Le vent souffle donc quand le soleil réchauffe davantage une région en créant des différences de pression (densité) qui entraînent des déplacements de masses d'air. Dans les régions chaudes, l'air s'élève et la pression s'abaisse. Dans les régions froides, l'air plus dense descend et la pression s'élève. Le vent souffle d'une zone de haute pression ou anticyclone vers une zone de basse pression ou cyclone ou dépression.

Plus la différence de pression est élevée, plus le vent est fort.

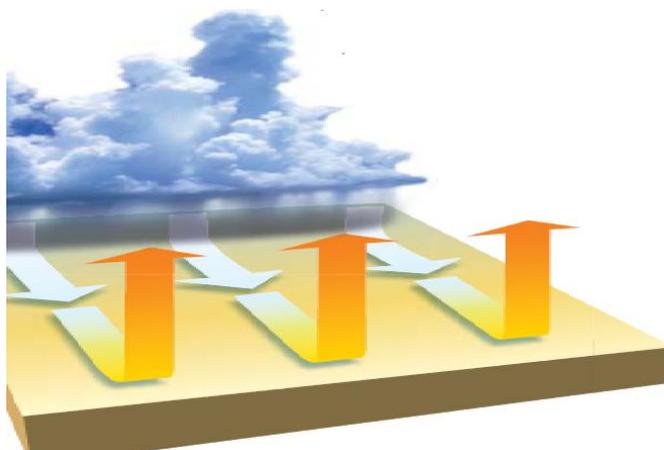


Fig.12 Productions du vent

### 3.2. UN AEROGENERATEUR (L'EOLIENNE)

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.



Fig.13 Productions du vent

### 3.3. HISTORIQUE DE L'EOLIENNE

L'énergie éolienne tire son nom d'Eole (en grec ancien Αἰολος / Aiolos), le nom donné au dieu du vent fils de Poséidon dans la Grèce Antique. Pendant des siècles, l'énergie éolienne a été utilisée pour fournir un travail mécanique.

L'exemple le plus connu est le moulin à vent. On pense que des roues à énergie éoliennes rudimentaires furent utilisées en Perse (Iran actuel) dès le VIIe siècle après JC., voire avant. Elles servaient à l'irrigation des terres cultivées et à la transformation du blé en farine : pour écraser du grain.



Fig.14 Moulin à vent

Il a aussi connu un grand développement en Europe au cours du XIVe siècle, en particulier aux Pays-Bas où servant à l'assèchement des polders. Outre le meulage du grain et l'irrigation des terres agricoles, les moulins à vent étaient utilisés pour un grand nombre de tâches, allant du pompage de l'eau de mer, au sciage du bois, en passant par la fabrication du papier et de l'huile ou encore le meulage de divers matériaux [1] [8].

Par la suite, pendant plusieurs décennies, l'énergie éolienne a servi à produire de l'énergie électrique dans des endroits reculés et donc non-connectés à un réseau électrique. Des installations sans stockage d'énergie impliquaient que le besoin en énergie et la présence d'énergie éolienne soient simultanés. La maîtrise du stockage par batteries a permis de stocker cette énergie et ainsi de l'utiliser sans présence de vent. Ce type d'installation ne concerne que des besoins domestiques, non appliqués à l'Industrie.

En 1888, Charles F. Brush construit une petite éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batteries.

La première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité a été développée par le Danois Poul La Cour en 1890, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse.

Dans les années suivantes, il créa l'éolienne Lykkegard, dont il avait vendu 72 exemplaires en 1908. Une éolienne expérimentale de 800 KVA a fonctionné de 1955 à 1963 en France, dans la Beauce. Elle avait été conçue par le Bureau d'Etudes Scientifiques et Techniques de Lucien Romani et exploitée pour le compte d'EDF : l'aérogénérateur 800 KVA BEST - Romani. Cette technologie a été quelque peu délaissée par la suite.

Il y eut une éolienne raccordée au secteur sur les hauteurs d'Alger (Délylbrahim) en 1957. Ce n'est que dans les années 1970 qu'elle sera relancée, en particulier au Danemark. Depuis les années 90, l'amélioration de la technologie des éoliennes a permis de construire des aérogénérateurs de plus de 1 MW. Ces unités se sont démocratisées et on en retrouve aujourd'hui dans plusieurs pays. Ces éoliennes servent à produire du courant alternatif pour les réseaux électriques, au même titre qu'un réacteur, un barrage hydroélectrique ou une centrale thermique au charbon.

### **3.4. L'ENERGIE EOLIENNE AU MONDE [10]**

L'industrie éolienne 2015 a fait un pas remarquable puisque les installations annuelles ont franchi la barre des 60 GW pour la première fois dans l'histoire. Plus de 63 GW de nouvelle puissance éolienne ont été mis en service après le dernier record en 2014 lorsque plus de 51,7 GW de nouvelle capacité ont été installés dans le monde.

En 2015, les investissements totaux dans le secteur de l'énergie propre ont atteint un niveau record de 329 milliards USD (296,6 milliards EUR). Les chiffres de 2015 ont augmenté de 4% par rapport à l'investissement en 2014 de 316 milliards USD (238,1 milliards d'EUR) et de battre le record précédent, fixé en 2011 à 3%.

La puissance éolienne totale à la fin de 2015 était de 432,9 GW, ce qui représente une croissance cumulée du marché de plus de 17 %. Cette croissance a été alimentée

par une étonnante nouvelle installation chiffre de 30 753 MW en Chine; L'industrie éolienne mondiale a installé 63 467 MW en 2015, ce qui représente une croissance annuelle du marché de 22%.

Au début de 2015, les anticipations de croissance du marché de l'énergie éolienne n'étaient pas excessives, le ralentissement économique continu en Europe et certains marchés émergents et l'incertitude politique aux États-Unis rendant complexes les projections pour 2015.

La Chine, le plus grand marché global de l'énergie éolienne depuis 2009, a conservé la première place en 2015. Fidèle à la forme, les installations en Asie ont dominé à nouveau les marchés mondiaux, l'Europe à la deuxième place et l'Amérique du Nord a la troisième place.

Il en résulte qu'en 2015, comme en 2014 et en 2013, la majorité des installations éoliennes dans le monde étaient de nouveau hors OCDE. C'est le cas depuis 2010, à l'exception de 2012. Cette tendance se poursuivra dans un avenir prévisible.

À la fin de l'année dernière, le nombre de pays ayant une capacité installée de plus de 1 000 MW était de 26: dont 17 en Europe; 4 en Asie-Pacifique (Chine, Inde, Japon et Australie); 3 en Amérique du Nord (Canada, Mexique, États-Unis), 1 en Amérique latine (Brésil) et 1 en Afrique (Afrique du Sud).

À la fin de l'année dernière, huit pays avaient plus de 10 000 MW de puissance installée, dont la Chine (145 362 MW), les États-Unis (74 471 MW), l'Allemagne (44 947 MW), l'Inde (25 088 MW), l'Espagne (23 025 MW) 13 063 MW), au Canada (11 205 MW) et en France (10 358 MW).

La Chine a franchi la barre des 100 000 MW en 2014, ajoutant une autre étape importante à son histoire déjà exceptionnelle en matière de développement des énergies renouvelables depuis 2005. Cette année, elle a fait l'histoire et renforcé sa position sur le classement.

L'Europe et l'Amérique du Nord ont toutes deux connu des années fortes en 2015, dirigées respectivement par l'Allemagne et les États-Unis. Le Guatemala et la Jordanie ont chacun ajouté leurs premiers grands parcs éoliens commerciaux, et l'Afrique du Sud est devenue le premier marché africain à passer la marque 1 GW.

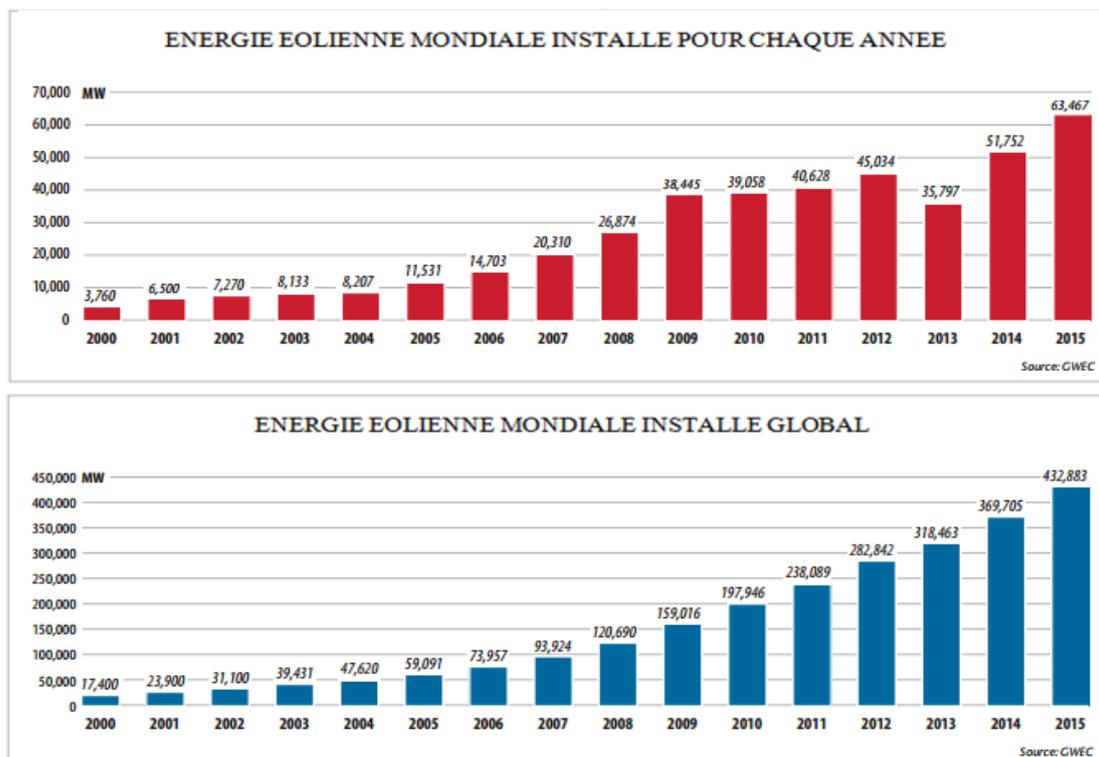


Fig.15 L'énergie éolienne au monde

### 3.5. L'ENERGIE EOLIENNE EN ALGERIE

Le centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER), publie, à l'occasion du solstice d'hiver, une nouvelle carte du gisement éolien national.

L'étude la plus récente, a été réalisée en 2013 par Dr. Sidi Mohammed Boudia qui a réactualisé la carte des vents à 10m [11], en utilisant des données météorologiques plus récentes et un plus grand nombre de points de mesure par rapport aux précédents travaux.

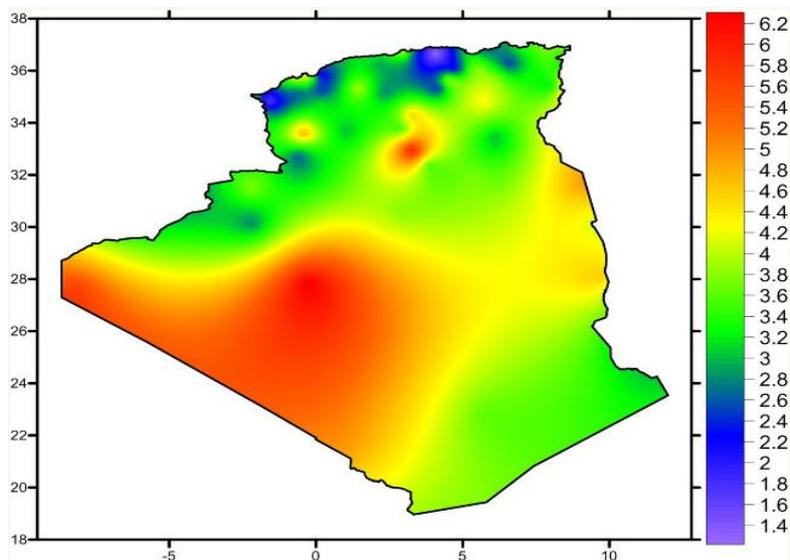


Fig.16 Carte du gisement éolien en Algérie

Le potentiel énergétique est satisfaisant même très bon sachant que la région d'Adrar se trouve dans un couloir de vent de 6 m/s et se prolongent jusque à 20 m/s tandis que pour In Amenas le régime n'excède pas 14 m/s. même il y'a une très grande a un gisement de vent de l'ordre de 6 m/s.

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger). Conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30 m de haut avec un diamètre de 25 m fut racheté par électricité et Gaz d'Algérie puis démontée et installée en Algérie.

La plus grande éolienne de pompage a été installée en 1953 à Adrar par les services de la colonisation et de l'hydraulique. Montée sur u mât de 25 mètres de hauteur, cette machine trois pales de 15 mètres de diamètre a fonctionné pendant près de 10 ans.

La capacité totale à installer à l'horizon 2030, fixée à 5010 MW pour l'éolien, ET pendant la période 2015 - 2020, il est programmé de réaliser 1 GW. A noter également que le réseau d'Adrar sera interconnecté au réseau Nord à l'horizon 2020 Le bilan de réalisation présenté par SKTM fait apparaître que la puissance totale installée en éolien est de 10 MW (ferme éolienne de Kaberten) [6] [12]. Le nouvel Atlas éolien de l'ONM a mis en évidence l'existence d'autres sites ventés dans d'autres régions du Sud. Outre Adrar, les régions de Tamanrasset,

Djanet et In Salah disposeraient d'un potentiel. Une étude détaillée de ces nouvelles zones est nécessaire. A cet effet, 10 mâts de mesures éoliennes sont en cours d'implantation. Le choix des sites d'implantation des futurs parcs éoliens se fera donc ultérieurement.

### *3.5.1. La ferme éolienne d'Adrar*

Première du genre à l'échelle nationale, cette nouvelle centrale de production d'électricité est implantée dans la zone de Kabertène à 72 km au nord du chef-lieu de la wilaya d'Adrar.

Ce parc éolien a été mis en service début juin 2014 et officiellement inauguré le 03 juillet 2014. Il est composé de 12 éoliennes type Gamesa G52. La puissance de chaque éolienne est de 850 kW (totalisant ainsi 10.2 MW pour le parc éolien) et leur diamètre est de 52 mètres.

La hauteur du mât est de 55 m. Les éoliennes sont implantées sur un site d'une superficie globale de 33 hectares. D'un coût global de 2,8 milliards de dinars, le

projet a été exécuté par deux filiales du groupe SONELGAZ sous la supervision de CEGELEC (ENERGA pour le Génie Civil et ETTERKIB pour le montage d'équipements) [6] [12].

L'énergie électrique fournie par ce parc éolien est injectée dans le réseau MT local. Les enregistrements des performances des éoliennes ont montré que la production d'électricité avait atteint certains jours la puissance nominale de la ferme (i.e. 10.2 MW).

Le taux de pénétration de l'énergie éolienne est de 5% par rapport au réseau local. Le contrôle est assuré par un système SCADA, la communication entre les éoliennes et la salle de contrôle étant assurée par des câbles en fibre optique. La ferme éolienne de Kaberten est la première réalisation de ce type en Algérie. C'est donc une ferme pilote dont le retour d'expériences est attendu par tous et notamment le comportement des éoliennes sous de hautes températures ainsi que sous l'influence des vents de sable.

### **3.6. LES DIFFERENTS TYPES D'UN SYSTEME EOLIEN**

#### *3.6.1. Eoliennes à axe vertical*

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation

Le rotor de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur

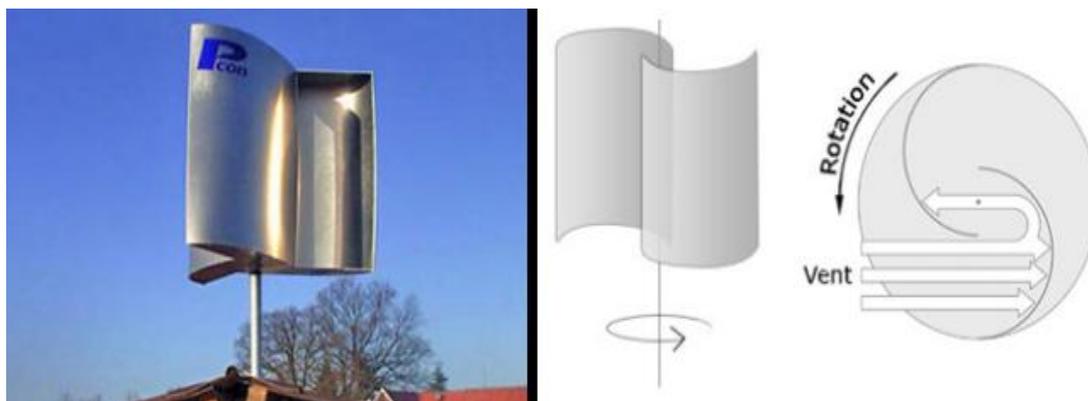


Fig.17 Eolienne type Savonius

Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30.

Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles figure 18 est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif.

Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur).

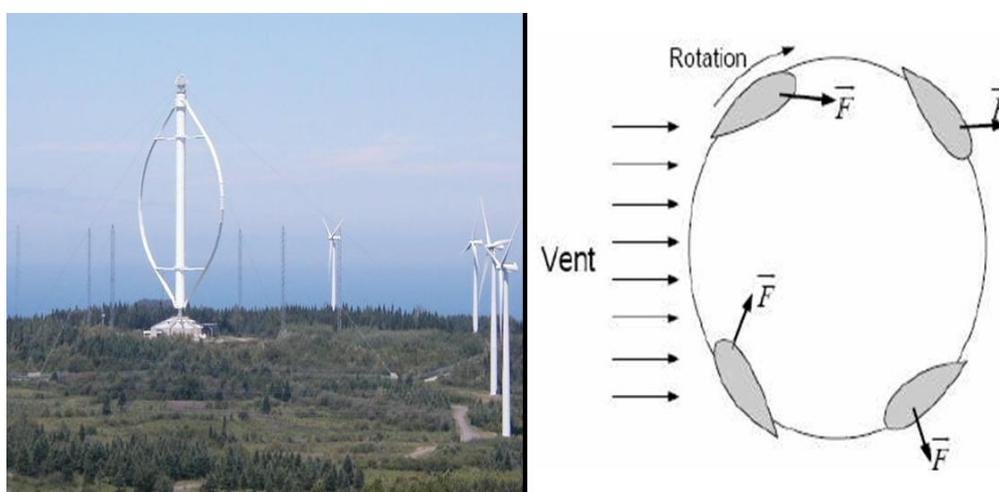


Fig.18 Eolienne type Darrieus Parc Le Nordais, Canada.

On trouve désormais des éoliennes à axes verticaux développées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Ce sont des machines de faible puissance, de 100 W à 25 kW. Elles sont destinées à des utilisations permanentes. Par exemple la charge de batteries servant à alimenter un chalet en montagne. Elles sont de conception simple et robuste et ne nécessitent pas ou peu d'entretien.

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. En effet la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées

### 3.6.2. *Eoliennes à axe horizontal*

Ces éoliennes captent le vent en hauteur et loin du sol; à cette hauteur le vent est beaucoup moins ralenti par le relief. A dimension d'hélice identique, on pourra produire plus de puissance par le biais de cette structure par rapport aux éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.

Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal.



*Fig.19 Ferme éolienne verticale d'Adrar 10 (MW).*

La plupart des éoliennes actuellement installées utilisent des turbines à axe horizontal. Le tableau propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice. A titre de comparaison, la puissance d'une tranche de centrale nucléaire est de 1400 MW environ.

#### **4. CONCLUSION**

Dans ce chapitre, nous avons présenté globalement les énergies renouvelables l'histoire de chaque énergies leurs développements a l'échelle mondiale puis a l'échelle Algérien puis les différent type d'exploitation de ces énergie vertes.

La biomasse et l'hydraulique sont moins intéressantes pour un pays comme l'Algérie à cause du manque des ressources de ces énergies.

Alors que énergies les plus intéressantes et les plus riches pour l'exploitation pour notre pays sont premièrement l'énergie solaire (la plus puissante a cause de la géographie algérienne on peut alimenter 10 fois le monde si en l'exploite complètement). L'énergie géothermique ça apparait vraiment satisfaisante à cause de nombre important des sources thermales sous terre. Enfin l'énergie éolienne est acceptable si on analyse le potentiel algérien et la nature de l'exploitation de cette énergie qui est classique et facile pour la production électrique. Alors dans le chapitre suivant on vas étudier l'élément principal pour la conversion de l'énergie du vent l'aérogénérateur.

## CHAPITRE II

# L'AEROGENERATEUR CONSTITUTION MECANIQUE ET ELECTRIQUE

### 1. INTRODUCTION

Nous avons vu dans le chapitre précédent l'utilité des énergies renouvelables en particulier l'énergie éolienne, nous allons dans ce chapitre étudier les éoliennes à axes verticales parce qu'elles sont les plus utilisées grâce à leurs faibles emprise au sol et leurs efficacité énergétique.

L'aérogénérateur est le composant principal pour la transformation de l'énergie du vent en électricité, alors dans ce chapitre on va détailler l'étude pour chaque partie de l'aérogénérateur. Que ce soit pour les turbines à vitesse fixe ou variable.

Les éoliennes doivent extraire le maximum de la puissance de vent avec les systèmes mécaniques en toute sécurité et exploiter la production de l'électricité avec le meilleur moyen de la transformation, alors le choix de la génératrice doit être expliqué. Les constituants mécaniques changent d'une éolienne à l'autre suivant plusieurs critères comme la puissance, type de rotor (rotor à vitesse fixe ou variable), et le choix de la génératrice.

### 2. CONSTITUANTS MECANQUES DE L'EOLIENNE

La chaîne de convection éolienne se constitue d'une partie mécanique la turbine et une partie électrique la génératrice malgré que le rapport entre les deux parties est indiscutable.

Dans cette section nous allons détailler les constitutions mécaniques de l'aérogénérateur de la fondation jusqu'au mécanisme d'entraînement de la génératrice avec des exemples réels utilisés dans l'industrie pour la production électrique.

#### 2.1. LES FONDATIONS

Les fondations sont la base d'une éolienne, c'est elles qui devront supporter le poids de l'éolienne. Les travaux de terrassement et la réalisation de fondations sont généralement exécutés par des sociétés locales spécialisées dans le génie civil.

La fondation d'une éolienne s'étend sur une surface comprise entre 100 et 300 m<sup>2</sup> selon les modèles et les puissances, et jusqu'à 3,20 m de profondeur pour une

éolienne de 2 MW si le sol est stable. Cette emprise au sol est ramenée à moins de 100 m<sup>2</sup> lorsque le chantier est terminé et les fondations recouvertes de terre et d'un empierrement [14].

Le volume de béton dans les fondations d'une éolienne est comparable au volume d'une grande maison (de l'ordre de 400 m<sup>3</sup> pour une éolienne de 2,5 MW). Le charroi lié à l'installation d'une éolienne est assuré par environ 100 camions. Le plus souvent, l'accès à un chantier éolien emprunte les routes et chemins existants : l'impact est ainsi limité et moins coûteux.

Au terme de l'exploitation du parc éolien, chaque éolienne est démantelée. Cela se fait généralement par grue ou, dans certains cas, par implosion de la base du mât. Les deux techniques sont très sécurisées et non polluantes.



Fig.1 Fondation de l'éolienne.

### 2.1.1. Type de fondation

a) *Fondation onshore* : Il existe 2 principaux types de fondations onshore [2]:

- les fondations superficielles (ou massifs gravitaires), lorsque le sol d'assise est homogène et de bonne portance
- les fondations sur pieux, lorsque le sol d'assise présente une portance trop faible et que le bon sol se trouve à une profondeur importante, de l'ordre de plus de 15 m

b) *Fondation offshore* : Il existe 3 principaux types de fondation offshore [16]

- la fondation monopieu : Le monopieu est la solution la plus souvent sélectionnée pour les projets de parcs récents, installation par Battage, forage du fonds marin ou vibrofonçage (Fig.2a).

- la fondation gravitaire : matière de construction est l'acier et/ou béton, installation descente par grue ou flottaison puis lestage sur site (Fig.2b).
- la fondation en structures métalliques ou « jacket » : matière de construction est l'acier-tubulaire installation : descente par grue puis ancrage des pieds par des pieux (soit pré-battus/pré-forés soit battus/forés après l'installation) (Fig.2c).

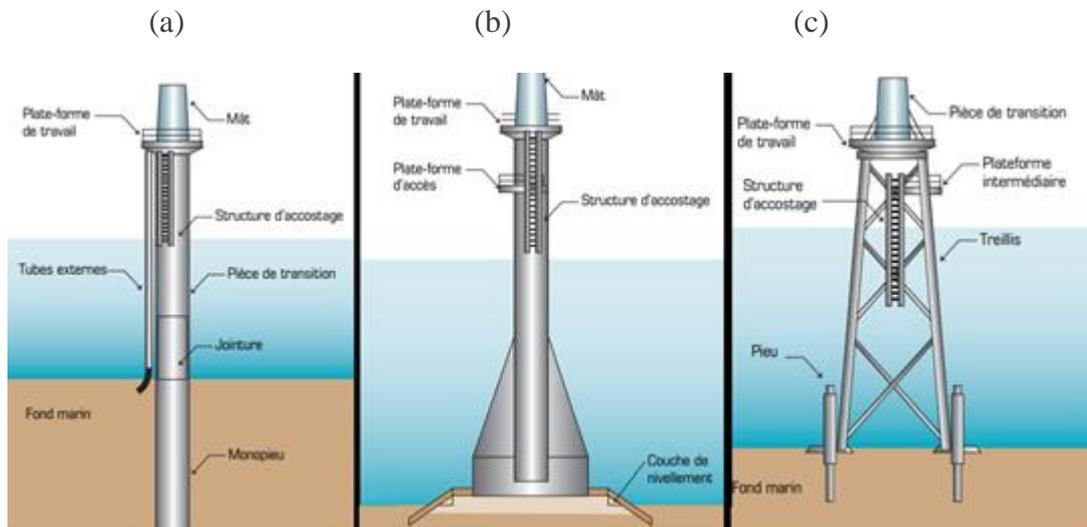


Fig.2 Type Fondation offshore : a) la fondation monopieu b) la fondation gravitaire c) la fondation en structures jacket.

## 2.2. LE MAT OU LE PYLONE SUPPORT

Le pylône support d'aérogénérateur (aussi appelé tour ou mât dans le cas des grandes éoliennes) est la pièce la plus imposante de l'éolienne est une gigantesque structure d'acier ou de béton qui supporte l'éolienne, y amène les raccordements nécessaires et permet d'accéder à la nacelle. Sa hauteur peut atteindre plus de 100 mètres, soit la hauteur d'un édifice de 20 étages [15]. Elle maintient donc la nacelle en altitude, là où le vent est le plus constant et le plus fort.

La hauteur du mat est très importante car l'aérogénérateur doit se situer en dehors des perturbations dues au sol et aux obstacles environnant, le vent y est plus fort et plus régulier. Généralement la taille du mât est très légèrement supérieure au diamètre des pales exemple éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90m, mât de 80 m de hauteur et GAMESA G52-850 KW l'éolienne utilisé au site Adrar a une hauteur de 44 et 49 m de 45 et 53 T [19].

Pour les éoliennes le pylône support peut être auto-porteur, haubané rabattable, caréné ou à treillis [4].

### 2.2.1. Mât auto-porteur

De forme tubulaire et conique, aucun hauban n'est alors nécessaire, ce qui rend le mat auto-porteur plus esthétique. Le prix d'une telle tour peut atteindre trois ou quatre fois celui d'un pylône haubané. La solidité de la fondation sera un élément important. Le mat peut être réalisé en acier ou en béton armé.

Actuellement les mâts en caisson, souvent en acier et fortement ancrés au sol sur de solides fondations, sont très répandus pour les grandes éoliennes de forte puissance. Les mâts des éoliennes sont fabriqués à partir de tubes coniques, en acier ou en béton précontraint et comportent généralement trois ou quatre sections. La hauteur des tours d'éoliennes actuelles oscille entre 65 et 140 m. Le diamètre de la base d'une tour peut-être de plus 5 m en diminuant progressivement pour atteindre environ 3 m au sommet.

### 2.2.2. Mâts haubané

D'un coût à hauteur égale ou inférieure à celui du support auto-porteur, permet un meilleur accès à la nacelle pour entretien. La dimension du tuyau d'acier est surtout fonction du poids de l'éolienne, car ce sont les haubans qui assurent la stabilité de l'ensemble. Si l'haubanage permet de réduire les dimensions du mât, plus il y a de haubans et de structure porteuse, plus le bruit est élevé dans les grands vents. Ce type de mat augmente l'occupation au sol ainsi que l'impact visuel. Cette structure est la plus couramment utilisée dans le cas du petit éolien.

Un mât haubané est composé de tubes en acier assemblés entre eux à l'aide de brides boulonnées ou de manchons. Les quatre haubans sont fixés au niveau des jonctions et rattachés au sol sur les massifs d'ancrages.

### 2.2.3. Mâts en treillis métallique

C'est une construction plus légère et moins coûteuse que la tour cylindrique pour une même résistance. Par contre l'impact visuel est totalement différente. De plus ce type de pylône génère beaucoup de perturbations aérodynamiques dans l'écoulement du vent.



Fig.3 Type mat : a) Mat auto-porteur b) Mat haubané c) Mat en treillis métallique

### 2.3. LA NACELLE

La nacelle contient tous les éléments mécaniques qui permettent de transformer l'énergie mécanique produite par les pales en énergie électrique, généralement l'enveloppe de la nacelle est en matériaux composites. Le processus de fabrication de la nacelle et du nez de rotor est identique à celui d'une pale, sans nécessiter la même précision et la même résistance. La nacelle se compose généralement de plusieurs sections. Le châssis de la nacelle est composé de pièces de fonderie usinées de grande dimension. L'ossature d'une éolienne de 2 MW est généralement composée de 2 ou 3 modules pouvant peser jusqu'à 4,5 tonnes chacun [24]. La (Fig.3) représente les composants de la nacelle GAMESA G52-850 KW utilisé au Park a Kaberten (Adrar) [19].

Les constitutions de la nacelle GAMESA G52-850 KW sont (Fig.4) :

1- Service de grue ; 2- Génératrice ; 3-Système de refroidissement ; 4- Unité de commande ; 5- Boîte de vitesses ; 6- Arbre principal ; 7- Système de verrouillage rotor ; 8- Pales ; 9-Moyeu ; 10- Couverture de moyeu ; 11- Support des pales  
12- Cadre ; 13- Unité hydraulique ; 14- Amortisseurs ; 15- Anneaux ; 16- Frein  
17- Tour ; 18- Engrenages ; 19- Arbre à grande vitesse.

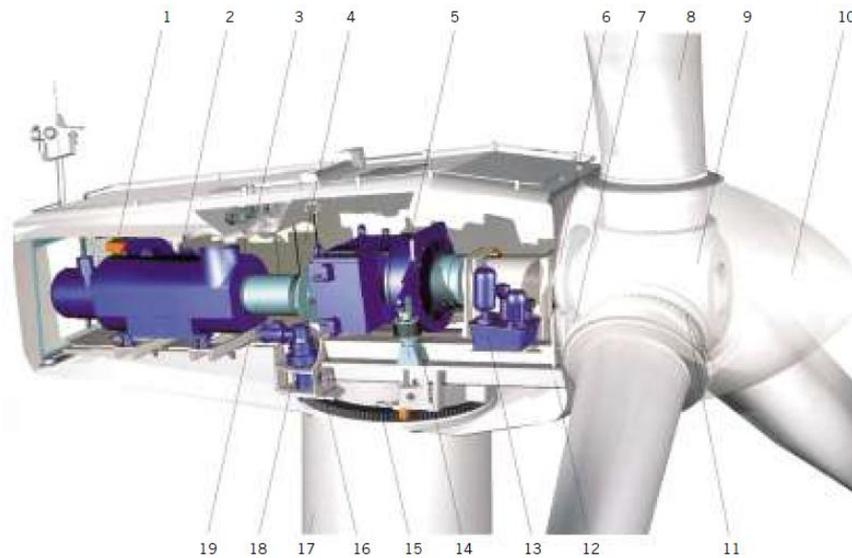


Fig.4 Les composant de la nacelle GAMESA G52-850 KW

### 2.3.1. Le multiplicateur

L'arbre principal entraîne le multiplicateur qui par un système complexe d'engrenages va transformer le mouvement lent et puissant de l'axe principal en un mouvement très rapide mais de force plus faible.

Le principe est identique à celui d'un vélo doté de pignon et de plateau. Lorsque l'on met un grand plateau pour un petit pignon, la force exercée sur les pédales directement reliées au plateau va devoir être très puissante le mouvement sera par conséquent assez lent, en revanche le mouvement transmis grâce à la chaîne à l'engrenage des pignons sera beaucoup plus rapide mais moins fort [18]. La Figure (II.5) représente multiplicateur pour Gamesa G52, numéro de pièce R916637481 utiliser au Park a Kaberten (Adrar) [19].



Fig.5 Multiplicateur GAMESA G52-850 KW

### 2.3.2. L'arbre principal (ou axe principal)

Cet axe est directement entraîné par le rotor (principalement par les pales), il tourne à basse vitesse mais avec beaucoup de force (couple fort). Il est relié ensuite au multiplicateur, c'est une pièce imposante car elle subit des efforts élevés. Pour les éoliennes sans boîte de vitesse (synchrones), il n'y a qu'un arbre unique. La figure 6 représente l'arbre principale pour l'arbre principal de l'éolienne NTK 500.



Fig.6 L'arbre principal de l'éolienne NTK 500

### 2.3.3. L'arbre rapide (ou axe secondaire)

L'arbre rapide est relié en sortie du multiplicateur, il fait la liaison entre le multiplicateur et la génératrice. Sa rotation est donc beaucoup plus rapide (environ 1500tr/min), mais sa force est bien plus faible. .

### 2.3.4. Le rotor

Aussi appelé hélice, est la partie tournante de l'éolienne. Il est constitué des pales et nez (ou moyeu), ainsi que les nombreux dispositifs de commande situés dans le nez, sans diamètre et son volume change suivant la puissance de l'éolienne. Par exemple le rotor de la Gamesa G52 utilisé au Park a Kaberten (Adrar) a une puissance de 850 KW a un diamètre de 52 m et un volume de 2.124 m<sup>2</sup> et sa pèse T [6].

Pour la puissance on peut calculer approximativement la puissance de l'éolienne en fonction du diamètre de son rotor [15].

$$P = 0.15D^{2.15} \quad (II.1)$$

P : puissance (en kW)

D : diamètre en m

$$P_{G52} = 0.15(52)^{2.15} = 734 \text{ KW}$$

On peut distinguer deux types de rotors [23] :

- Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine synchrone) connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.
- Les rotors à vitesse variable sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié voire supprimé. Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique. L'ensemble des éléments du rotor qui est reliée au multiplicateur par l'arbre principal est toujours orientée de façon à être face au vent grâce à la girouette et à l'anémomètre.

#### a) Les pales

Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées.

Actuellement, les matériaux composites tels la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique, De nombreuses études en souffleries ont été réalisées afin de déterminer le nombre optimal de pales pour le fonctionnement de l'éolienne [25] [27].

On a démontré que:

- Moins les pales sont nombreuses, plus l'éolienne met du temps pour démarrer et inversement.
- De plus, lorsque l'éolienne a deux pales, les vibrations sont très fortes et rendent ainsi l'éolienne fragile. Lorsqu'elle en possède plus de trois, les pales sont perturbées par l'air déplacé par la pale précédente. Le rendement s'en trouve ainsi réduit.

Ainsi le nombre optimal de pales pour le fonctionnement d'une éolienne est de trois. Les pales sont torsadées afin d'offrir plus de surface au vent et peuvent aussi s'orienter. La figure 7a représente les pales d'une et Lames de Vestas V66 1.5MW, la figure 7b Gamesa G52 utilisé au Park a Kaberten (Adrar) [19].



Fig.7 Les pales de rotor : a) pales d'une et Lames de Vestas V66 1.5MW b) pales Gamesa G52 utilisé au Park a Kaberten (Adrar)

#### b) Le moyeu

Encore appelé "nez", est en général une pièce d'acier moulée. Il supporte les pales du rotor et se monte sur l'arbre lent d'entrée du multiplicateur. Il est pourvu d'un système de régulation qui permet la modification du pas des pales "Pitch control". Le moyeu est conçu de manière à permettre un accès aux techniciens directement depuis la nacelle [25]. La figure 8a représente un moyeu de rotor AN Bonus MKIV 600 kW et la figure 8.b représente Moyeu de rotor GE 1.5 MW [19].



Fig.8 Moyeu de rotor : a) représente Moyeu de rotor AN Bonus MKIV 600 kW b) Moyeu de rotor GE 1.5 MW.

Le rotor comporte autres composants mécaniques comme les freins, les amortisseurs, disque d'accouplement, paliers, La girouette et l'anémomètre etc.....et plusieurs système mécaniques nous allons mentionner les systèmes de protection et de freinage et le système de régulation mécanique pitch control.

Même il comporte des composants hydrauliques et des systèmes de refroidissement.

### 2.3.5. *Système de régulation et de protection*

Le système de régulation et de protection mécanique sans des systèmes complémentaire composer d'un un ensemble d'éléments essentiel de la survie d'une éolienne, afin d'éviter la destruction de l'aéromoteur lorsque le vent est trop violent. Il est nécessaire d'équiper l'éolienne d'un système permettant de diminuer les contraintes mécaniques sur la machine en cas de survitesse du rotor [23]. Ces systèmes peuvent être plus ou moins fins, et plus ou moins automatiques.

La plupart des accidents survenus sur un aérogénérateur sont la cause d'un sous-freinage de ces machines. On cherche donc à installer sur une éolienne au moins deux systèmes de freinage afin de protéger le générateur électrique contre la surproduction et la surchauffe et d'éviter une casse mécanique importante de l'éolienne elle-même.

On appelle « vitesse de régulation » la vitesse du vent à laquelle le mécanisme de régulation est pleinement activé.

#### a) *Système de freinage manuel*

C'est le moyen le plus simple pour éviter la destruction d'une machine, lorsque le vent atteint une certaine vitesse, un opérateur immobilise l'éolienne, cette immobilisation peut être effectuée de plusieurs manières [15] [23]:

- A l'aide d'un frein ;
- En changeant l'orientation de l'hélice : l'hélice est placée parallèlement au vent
- En modifiant le calage des pales afin d'obtenir un couple moteur nul.

#### c) *Système de freinage automatique*

- Régulation et freinage par basculement de l'éolienne

Le basculement de l'éolienne entraîne une réduction de la surface effective balayée par le rotor. Pour réduire cette surface il faut augmenter l'angle formé par l'axe de rotation du rotor et la direction du vent dominant soit en faisant basculer l'hélice vers le haut soit en le faisant pivoter sur le côté. Lorsque le rotor est "effacé" vers le haut ou sur le côté, le rendement du rotor diminue considérablement et la puissance produite chute rapidement.

Ce dispositif est installé essentiellement sur les petites éoliennes, l'intervention de l'opérateur peut être remplacée et automatisée par action du vent sur une "palette" de commande parallèle et solidaire du plan de rotation de l'hélice. Lorsque la pression du vent sur la palette atteint un certain seuil, celle-ci entraîne la

commande d'un frein ou de la mise en drapeau. Cette palette peut être associée à un ressort permettant de replacer l'hélice dans sa position normale lorsque la pression du vent sur la palette diminue. Le passage d'une position à l'autre peut être progressif et l'angle formé par le plan de l'hélice et le vent dépendra de la pression sur la palette (entre  $0^\circ$  : vitesse nominale et  $90^\circ$  : arrêt de la machine). La modification de cet angle modifie les efforts de l'air sur les pales [23].

Ce système peut être utilisé uniquement sur des aéromoteurs dont la vitesse de rotation n'a pas à être constante et présente l'inconvénient d'interrompre le fonctionnement de l'aérogénérateur au delà d'une vitesse de vent limite par exemple sur la majorité des éoliennes de pompage pour lesquelles le rendement et la vitesse de rotation ne sont pas importants.

- Régulation et freinage par gouvernail articulé

À partir d'un certain niveau de vent, jugé excessif pour la sécurité mécanique de l'éolienne, le gouvernail se replie progressivement et automatiquement en travers de l'axe du vent. Non seulement il freine l'écoulement, ralentissant la vitesse, mais il détourne l'éolienne de la perpendiculaire au vent. Celle-ci devient alors de moins en moins efficace et sa vitesse ne peut augmenter même si le vent force. On parle généralement d'effacement latéral ou de "furling" dans ce cas précis, ceci est très utilisé pour les petites éoliennes car c'est un système très simple à mettre en œuvre.

#### *b) Système de régulation aérodynamique [28]*

- Le pas variable

Le pas variable, aussi appelé "pitch control", est un système de régulation aérodynamique actif. Ce système consiste à faire varier l'angle de calage des pales sur le moyeu à l'aide de vérins hydrauliques autour d'un axe longitudinal pour profiter au maximum du vent instantané et limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale. La variation de l'angle de calage entraîne une diminution ou une augmentation de la portance de la pale, donc du couple moteur. Un système de contrôle permet de déterminer la meilleure position des pales en fonction de la vitesse du vent et commande le système hydraulique afin d'exécuter le positionnement.

Ce système permet :

- d'arrêter l'éolienne ou en limiter la puissance afin de la protéger des vents violents en plaçant les pales en drapeau et réduisant ainsi la prise au vent ;
- de maximiser l'énergie absorbée par l'éolienne pour la faire démarrer : généralement les pales pivotent de quelques degrés à chaque variation de la vitesse

du vent de manière à ce que les pales soient toujours positionnées avec un angle optimal par rapport à la direction du vent pour en extraire la puissance maximale.

C'est le système le plus efficace car il permet une régulation constante et presque parfaite de la rotation du générateur en bout de ligne, donc de la puissance, mais c'est un dispositif complexe, qui exige davantage d'entretien. La figure 9 représente un contrôleur de calage des pales sur une maquette 1:50 d'éolienne offshore



*Fig.9 Contrôle du calage des pales sur une maquette 1:50 d'éolienne offshore*

- Le pas fixe

La désignation "pas fixe" est impropre car en réalité elle désigne une pale dont le calage est fixe mais le pas varie tout le long de l'envergure de la pale (tout comme le pas variable, la pale est vrillée). Le pas fixe, aussi appelé "stall control", est un système de régulation aérodynamique passif. Les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Ce système empêche les pales, qui sont conçues spécialement pour subir des décrochages, d'accélérer en utilisant l'effet Stall qui agit comme un frein par le décrochage aérodynamique au niveau de la pale du rotor. En effet grâce à sa forme, la pale ne peut plus accélérer même si le vent augmente. Ce type de régulation est utilisé pour la plupart des petites éoliennes car il ne nécessite pas de pièces mobiles ni de système de régulation dans le rotor, c'est un système simple, fiable et moins coûteux mais il engendre des pertes d'efficacité au démarrage et dans les grandes vitesses de vent. L'utilisation de pales à pas fixe implique un seul point de fonctionnement défini par la vitesse de rotation du rotor et par la vitesse du vent.

### **3. LES CONSTITUANTS ELECTRIQUES DE L'EOLIENNE ET LEURS FONCTIONS RESPECTIVES**

Comme pour la partie mécanique, l'étude de la partie électrique va englober les parties essentielles du système électrique de l'aérogénérateur.

### **3.1. LES MOTEURS ELECTRIQUES**

Les moteurs à courant alternative pour application éolienne comme des moteurs spéciaux pour le freinage, pitch et de lacet peuvent être trouvés.

#### *3.1.1. Motorisation d'orientation des nacelles (Yaw control)*

Ce sont des moteur ou réducteurs utilisés pour contrôler l'angle de rotation de la nacelle autour de son axe vertical. Un contrôle efficace de la rotation de lacet est essentiel pour assurer que les éoliennes soient toujours tournées dans la bonne direction (directement confrontées au vent) [29].

Les réducteurs permettent d'aligner avec précision la nacelle avec la direction du vent. Bien que leurs dimensions soient compacts et leurs poids faibles, ces réducteurs sont extrêmement robustes et jouent un rôle fondamental dans l'exploitation de l'énergie éolienne dans le monde entier [30]. La Figure 9.a représente Motorisations d'orientation de la nacelle Bonfiglioli 700TW.

#### *3.1.2. Motorisation angle de calage (Pitch control)*

Des moteur utilisés pour la commande des pâles des turbines éoliennes sous le meilleur angle possible pour l'exploitation du vent, pour faire tourner le rotor de la façon la plus performante possible. Les caractéristiques techniques avancées, la conception extrêmement robuste et la capacité de couple élevée font en sorte que ces boîtes de vitesses soient parmi les favorites des fabricants d'éoliennes dans le monde entier. La figure 9.b représente Motorisations d'orientation et commande de pitch Bonfiglioli 700TW [30].

#### *3.1.3. Motorisation pour freinage*

Un système de moteur asservi. Utilisé pour freinage et freinage de maintien des moteurs capables de maintenir une certaine vitesse ou un couple bien précisent et dont la position est vérifiée en continu et corrigée en fonction de la mesure. La (Fig.10c) représente un Servomoteurs Brushless CA séries BCR Bonfiglioli 700TW



Fig.10 Moteur : a) moteur pour commande de nacelle b) moteur pour commande de pitch c) servomoteurs Brushless CA

### 3.2. LA GENERATRICE

La génératrice est un élément indispensable pour une éolienne elle nous permet la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique. Elle est soit directement sur l'axe de l'aéromoteur, soit entraînée par un multiplicateur. Elle se loge au niveau de la nacelle, le type de la génératrice change suivant l'exploitation, le fabricant et le type de l'éolienne si c'est une éolienne à vitesse fixe ou éoliennes à vitesse variable [26].

#### 3.2.1. Système utilisant une génératrice synchrone

L'utilisation des génératrices synchrones dans les applications éoliennes à grande puissance est récente. Deux types de génératrices sont utilisés, à bobinage inducteur ou à aimants permanents. Les génératrices synchrones à aimants permanents étaient, jusqu'ici, très peu utilisées à cause du prix relativement élevé des aimants (constitués de terres rares) [15].

La génératrice synchrone ou Machine Synchrone (MS) peut être utilisée dans le cas d'un entraînement direct lorsque la liaison mécanique entre le moyeu de l'éolienne et la génératrice est directe, sans utiliser de multiplicateur. Il faut cependant que la génératrice soit raccordée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de fréquence. Si la génératrice est à aimants permanents, elle peut fonctionner en mode autonome car elle n'a pas besoin d'excitation extérieure [31].

Le rotor est l'inducteur et le stator est l'induit. Le stator est constitué d'enroulements qui vont être le siège de courant électrique alternatif induit par la variation du flux du champ magnétique due au mouvement relatif de l'inducteur par rapport à l'induit. Cette technologie est privilégiée dans le cas des éoliennes offshore

car la maintenance est réduite par rapport à une technologie utilisant une boîte de vitesse. La figure 11 représente un parc éolien à base de machine synchrones Enercon E40 de Punta Aja, Corse, France.



*Fig.11 Éoliennes synchrones Enercon E40 - Parc éolien de Punta Aja, Corse, France*

### *3.2.2. Système utilisant une génératrice asynchrone*

La Machine Asynchrone (MAS) est utilisée dans la plupart des cas, car cette génératrice peut supporter de légères variations de vitesse ce qui est un atout pour les éoliennes où la vitesse du vent peut évoluer rapidement notamment lors de rafales. Ces variations de vitesses engendrent des sollicitations mécaniques importantes sur le système qui se trouvent plus réduites avec une machine asynchrone qu'avec une génératrice synchrone qui fonctionne à vitesse fixe. La machine asynchrone est peu utilisée sur site isolé car elle nécessite des batteries de condensateurs pour la fourniture d'énergie réactive. La génératrice asynchrone nécessite de fonctionner à une vitesse nominale de plusieurs centaines de tours par minute, ce qui implique l'utilisation d'un multiplicateur entre le rotor (arbre lent) et la génératrice (arbre rapide). Cette chaîne cinétique implique des forces de frottements qui empêchent la rotation du rotor par vent faible, il faut donc vaincre ces forces d'inertie au démarrage grâce à un coup de vent plus important, ce système est simple et utilisé depuis longtemps et économiquement est plus intéressant [15][32].

La génératrice asynchrone peut être :

- A rotor bobiné ou à bagues. Les enroulements du rotor couplés en étoile sont reliés à un système de bagues/balais permettant ainsi l'accès à leurs bornes pour la connexion d'un convertisseur statique dans le cas d'un pilotage de la machine par le rotor.
- A cage d'écureuil. Le rotor est constitué de barres court-circuitées par des anneaux aux deux extrémités de l'armature. Les enroulements rotoriques ne sont alors pas accessibles.

On peut reconnaître une éolienne utilisant une génératrice asynchrone par la forme allongée de la nacelle, qui abrite la chaîne cinétique.

### 3.2.3. *Système utilisant une génératrice a courant continue*

Aussi appelée dynamo, se compose de 2 parties : l'inducteur est un circuit magnétique (bobine magnétisante) dont le but est de créer un champ magnétique dans l'entrefer et l'enroulement d'induit dans lequel on récupère l'énergie électrique produite par la rotation du rotor. Afin de récupérer l'énergie produite, l'induit comporte un collecteur.

Le courant de sortie est proportionnel à la fréquence de rotation et est directement utilisable pour charger une batterie mais nécessite une conversion continu a l'alternatif pour une injection du courant dans le réseau électrique. L'entretien d'une génératrice à courant continu est plus fréquent car il faut changer régulièrement les balais assurant la liaison avec le collecteur rotatif.

Le passage par l'étage continu permet une grande liberté lors de la gestion de l'énergie produite par l'éolienne car on n'a pas de fréquence imposée. c'est un moyen très approprié pour une alimentation de laboratoire ou une habitation isolée qui possède des appareils fonctionnant directement en basse tension continue, de plus il est facile de stoker de l'énergie dans des batteries pour obtenir une source permanente [15] [33].

Par contre, il s'agit de se connecter au réseau alternatif, il faut y associer un onduleur ainsi que des filtres et des transformateurs qui permettront de convertir la tension continue en signal alternatif sinusoïdal montré à la figure 12.

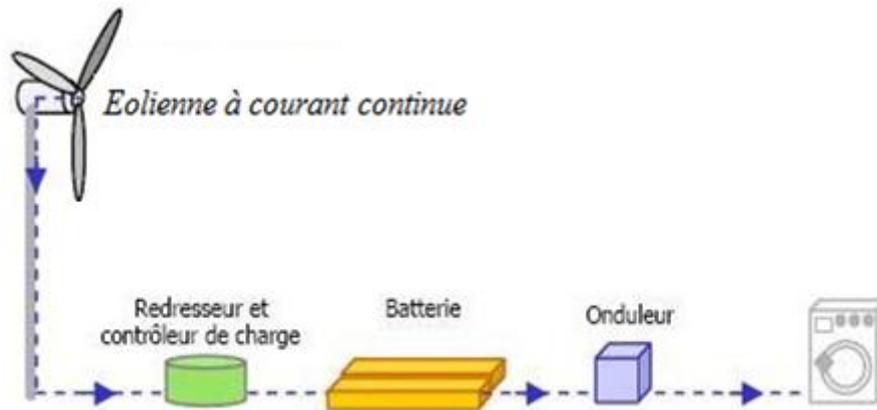


Fig.12 Système éolien utilisant une génératrice a courant continue

Il y'a d'autre parties électriques constituant le système éolien comme les convertisseurs statique, les unités de commande, les capteurs, systèmes avioniques et d'obstruction, les condensateurs, transformateur, les câbles, les connecteurs, les relais, les contacteurs, système de stockage et les systèmes de protection comme le système de protection contre la foudre.

#### 4. LA MACHINE ASYNCHRONE DOUBLE ALIMENTATION (MADA)

Utilisé depuis 1899, la Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA), DFIM (de l'anglais, Doubly Fed Induction Machine) est une machine asynchrone à rotor bobiné constituée d'un stator identique à celui d'une machine asynchrone à cage ou à une machine synchrone. C'est le rotor qui diffère radicalement car il n'est pas composé d'aimants ou d'une cage d'écureuil mais d'enroulements triphasés disposés de la même manière que les enroulements statorique.

La MADA est la plus utilisée dans le domaine éolien parce que les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchronisme car la fréquence est imposée par le réseau : la vitesse du rotor est presque constante, c'est une machine asynchrone à rotor bobiné et peut être alimentée par deux sources distinctes branchées respectivement au stator et au rotor. L'accès du rotor permet de régler la vitesse de rotation, en effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice et en moteur hypo-synchrone (au dessous de la vitesse de synchronisme) et hyper-synchrone (au dessus de la vitesse de synchronisme). On arrive ainsi à extraire le maximum de puissance possible avec une vitesse variable  $\pm 30\%$  de la vitesse de synchronisme alors sa nous donne une grande flexibilité d'application par rapport les autre machine traditionnel [34] [35].

#### 4.1. APPLICATION DA LA MADA EN MOTEUR

Au début, l'application de la machine asynchrone double alimentation était en mode moteur à vitesse variable par exemple entrainer des pompes, c'est un fonctionnement simple, le stator est branché à une source de fréquence  $f_1 = 50$  Hz alors que au lieu de court-circuiter ou de brancher le rotor à une résistance relions plutôt le rotor à une deuxième source ayant une fréquence  $f_2$ . Alors le moteur avec  $p$  nombre de paire de pôle à rotor bobiné est alimenté par deux sources, il doit tourner à une des deux vitesses  $n$  suivantes:

$$n = \frac{120}{p}(f_1 - f_2) \quad (II.2)$$

$$n = \frac{120}{p}(f_1 + f_2) \quad (II.3)$$

Pour une fréquence  $f_2$  donnée, la vitesse  $n$  dépend de la séquence des phases de la tension triphasée appliquée au rotor. Une séquence directe produit une vitesse hypo- synchrone, alors qu'une séquence inverse produit une vitesse hyper-synchrone.

##### 4.1.1. Moteur hypo-synchrone

Lorsque le moteur à rotor bobiné est alimenté par une source de tension  $E_s$  de fréquence  $f_1$  au stator et une source  $E_r$  de fréquence  $f_2$  au rotor, le glissement  $s$  est automatiquement imposé, soit  $g = f_2/f_1$ , la vitesse du moteur est donc également imposée par la relation  $n = n_s(1-g) = n_s\left(1 - \frac{f_2}{f_1}\right)$ . Comme la vitesse du moteur est imposée, on peut considérer cette machine comme un type spécial de moteur synchrone. En particulier, lorsque la fréquence  $f_2$  appliquée au rotor est nul (rotor alimenté en courant continu), la machine tourne à la vitesse synchrone  $n = n_s$ .

La puissance mécanique est égale :

$$P_m = \left(1 - \frac{f_2}{f_1}\right) P_r \quad (II.4)$$

Une partie de la puissance électrique fournie par le rotor  $P_r$  est dissipée dans la résistance du rotor par effet Joule  $P_j$  et le reste est absorbé par la source  $E_r$  ou réinjecté à la source  $E_s$  représente le réseau électrique en général [17] [36].

La figure 13 représente le principe du fonctionnement mode moteur hypo-synchrone.

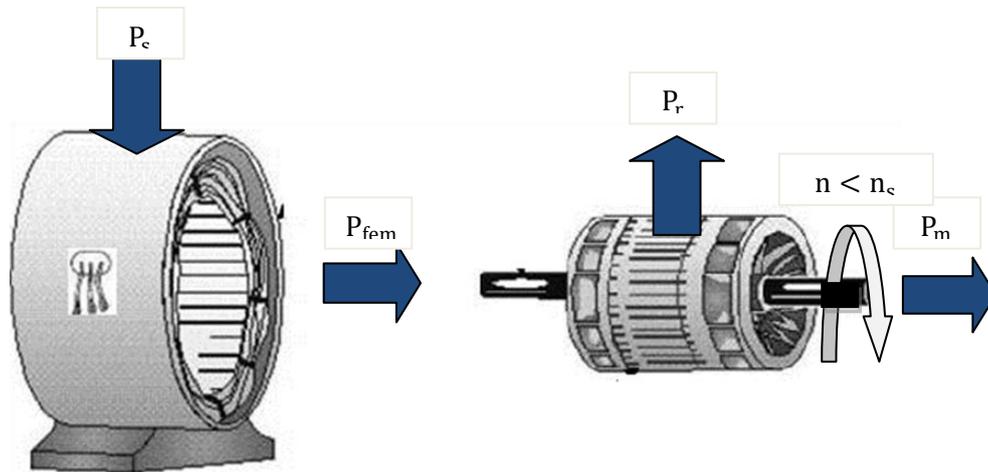


Fig.13 fonctionnement mode moteur hypo-synchrone

#### 4.1.2. Moteur hyper-synchrone

Lorsque l'on inverse la séquence des tensions appliquées au rotor, le moteur tourne à une vitesse hyper-synchrone. Dans ces circonstances, la puissance électrique s'inverse dans le rotor,

Dans ce cas, la source  $E_r$  fournit une puissance  $P_r$  au rotor. La puissance mécanique développée par le rotor est donc :

$$P_m = \left(1 + \frac{f_2}{f_1}\right) P_r \quad (II.5)$$

Ce moteur à double alimentation est parfois utilisé pour entraîner des charges à vitesse variable. La source de tension  $E_r$  est alors un convertisseur raccordé au réseau à 50 Hz et générant une fréquence  $f_2$  variable. L'utilisation d'un convertisseur au lieu de résistances permet de faire varier la vitesse dans une plus grande gamme et de retourner dans le réseau la puissance qui devrait autrement être gaspillée dans les résistances [17] [36].

$$P_m = \left(1 + \frac{f_2}{f_1}\right) P_r \quad (II.6)$$

La figure 14 représente le principe du fonctionnement mode moteur hyper-synchrone.

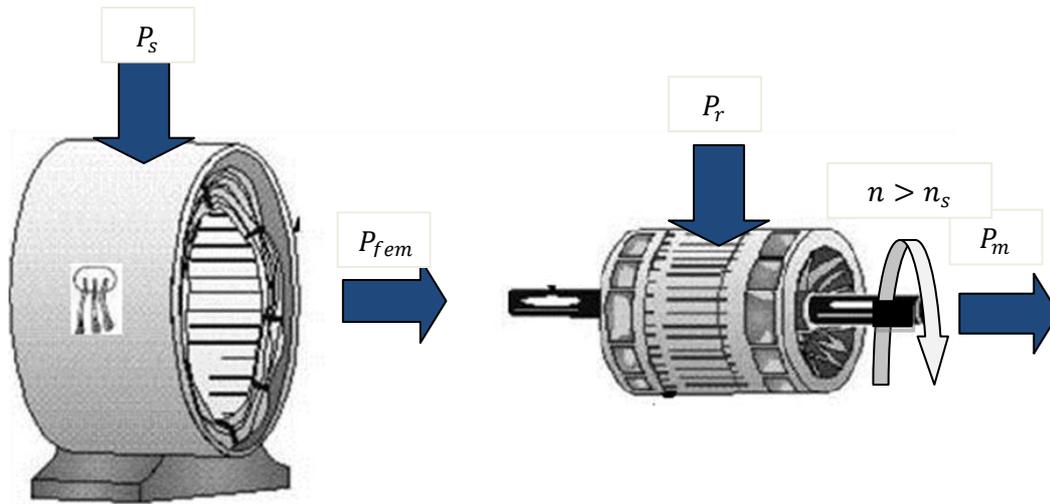


Fig.14 fonctionnement mode moteur hyper-synchrone

#### 4.2. APPLICATION DE LA MADA EN GÉNÉRATRICE

Le moteur asynchrone à double alimentation que nous venons de décrire peut fonctionner en générateur. Il suffit pour ce faire d'appliquer à l'arbre un couple dont le sens est tel qu'il tend à faire augmenter la vitesse sous-synchrone ou hyper-synchrone c'est la partie la plus intéressante dans notre étude pour l'utilisation de l'éolienne, la machine asynchrone double alimentée est la machine la plus utilisée dans le monde éolien pour cela nous allons utiliser cette machine en génératrice et essayer de la commander dans les chapitres suivants. La figure 14 représente un modèle d'un générateur MADA Hitachi 1,5 MW pour éolienne GE 575V

Sous l'effet de ce couple les pôles du rotor avancent légèrement en avant des pôles du stator, mais la vitesse en régime permanent reste inchangée. Par contre, les puissances circulant dans le stator et dans le rotor changent de sens comme l'indiquent la figure 15 (mode sous-synchrone) et la figure 16 (mode hyper-synchrone). La transition du mode sous-synchrone au mode hyper-synchrone s'effectue en changeant la séquence des phases de la tension  $E_r$ .

En plus de pouvoir fonctionner à vitesse variable, le générateur asynchrone à double alimentation possède un autre avantage par rapport à la machine asynchrone à cage : il permet de fournir une puissance à facteur de puissance unitaire. Pour ce faire, on ajuste l'amplitude de la tension  $E_r$ . Il n'est donc plus nécessaire d'installer des bancs de condensateurs aux bornes du stator pour lui fournir la puissance réactive.



Fig.15 Hitachi 1,5 MW générateur pour éolienne GE 575V

#### 4.2.1. Génératrice hypo-synchrone

Comme pour le moteur hypo-synchrone la vitesse de rotation reste inférieure à la vitesse de synchronisme et la source  $E_r$  fournit de la puissance  $P_r$  au rotor. Et la puissance électrique produite au stator est injectée au réseau. Sachant que  $E_r$  peut être le réseau électrique [17] [36].

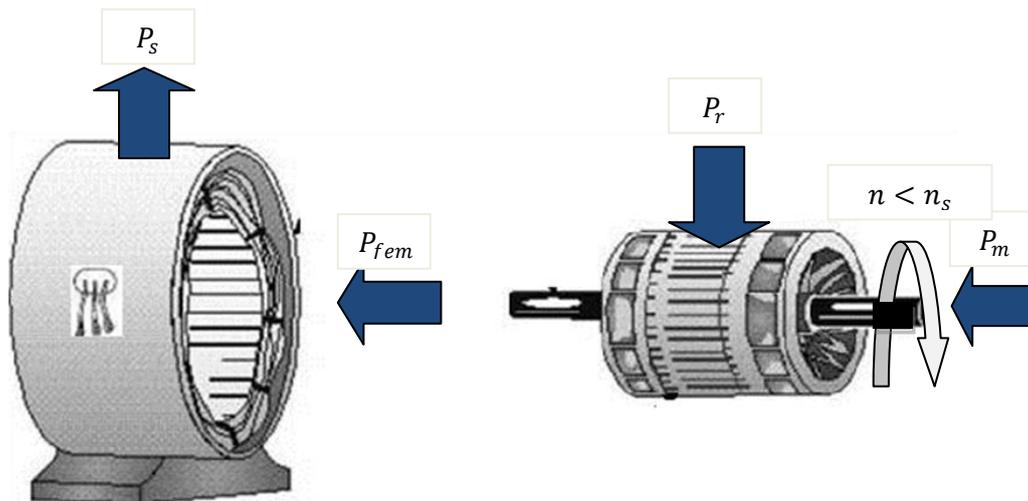


Fig.15 Fonctionnement mode génératrice hypo-synchrone

#### 4.2.2. Génératrice hyper-synchrone

Comme pour le moteur hyper-synchrone la vitesse de rotation reste supérieure à la vitesse de synchronisme, la puissance électrique produite  $P_s$  au stator est injectée au réseau source  $E_s$  et la puissance  $P_r$  la puissance du glissement est injectée à la source

$E_r$  sachant que  $E_r$  peut être le réseau électrique alors la puissance que en cas d'une machine asynchrone est dissipée par effet Joule et réinjecté au réseau électrique [17] [36].

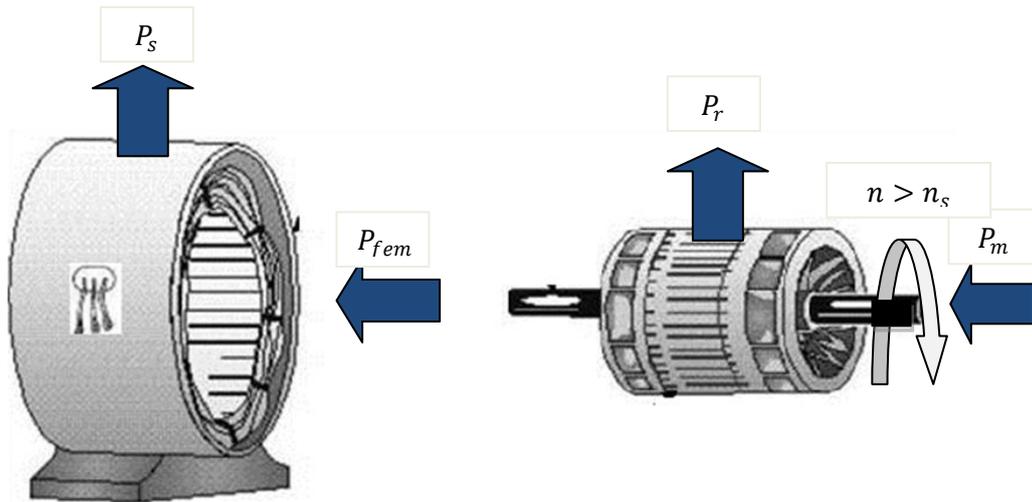


Fig.16 Fonctionnement mode génératrice hyper-synchrone

## 5. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

### 5.1. AVANTAGES

- L'énergie éolienne, propre, fiable, économique, et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement
- Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO<sub>2</sub>, etc.....
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuit, et inépuisable
- Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO<sub>2</sub> rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique
- Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance

- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs
- 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 thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales
- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables le coût de l'éolienne à diminuer presque 90% depuis le début des années 80. Le coût de l'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percées technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines
- 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, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà
- L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple

### **5.2. INCONVENIENT**

- Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :
- L'impact visuel : Ca reste néanmoins un thème subjectif, Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils extrémités de pale, mécanismes de transmission etc. et ne sont plus une gêne, même proche des machines (50-60 dB équivalent à une

conversation). Une distance d'environ huit fois le diamètre permet de ne plus distinguer aucun bruit lié à activité ( $< 40$  dB). De plus, il faut souligner que le bruit naturel du vent, pour des vitesses supérieures à 8 m/s, a tendance à masquer le bruit rayonné par l'éolienne

- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien n'est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux
- La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. 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 suit, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien. Selon l'article de, il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses.

## 6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a vu la description des différents systèmes éoliens et la constitution mécanique et électrique du système de conversion à savoir : la fondation, les pales, le multiplicateur, l'arbre, la génératrice.....et les différents types de chaque élément constructif.

L'aspect éolien se partage suivant le type de rotor s'il est à vitesse fixe ou variable ; et le type de génératrice alternatif (machine synchrone ou asynchrone) ou à courant continu.

Ainsi on peut distinguer deux techniques utilisées dans le contrôle mécanique de la turbine éolienne se basant sur le profil des pales (YAW control) et contrôle par variation de l'angle de calage (Pitch control).

Pour notre choix nous choisissons une éolienne à vitesse variable pour exploité l'énergie totale du vent et une génératrice asynchrone à double alimentation pour avoir une plage de réglages plus grande. Ainsi on aura un système de conversion optimal et plus puissant.

## CHAPITRE III

# MODELISATION DE L'AEROGENERATEUR PARTIE MECANIQUE ET ELECTRIQUE

## PARTIE 1: PARTIE MECANIQUE

### 1. INTRODUCTION

Nous avons vu dans le chapitre précédent la constitution mécanique et électrique de l'aérogénérateur et on a choisi un système de conversion éolienne à vitesse variable bien précis alors dans les chapitre 3 et 4 on va modéliser chaque partie de notre system choisi du gisement du vent, pâle, turbine, multiplicateur et la génératrice (MADA).

Le système de conversion éolienne à vitesse variable basé sur une MADA qu'on va modéliser, est illustré sur la figure 1. La turbine éolienne entraîne la MADA à une vitesse de rotation variable à travers un multiplicateur ou une boîte de vitesse. Le stator de la MADA est directement raccordé au réseau électrique, tandis que son rotor est connecté au réseau mais via un filtre triphasé de courant et deux convertisseurs statiques bidirectionnels triphasés commandés en modulation de largeur d'impulsion (MLI), mis en cascade à travers un bus continu.

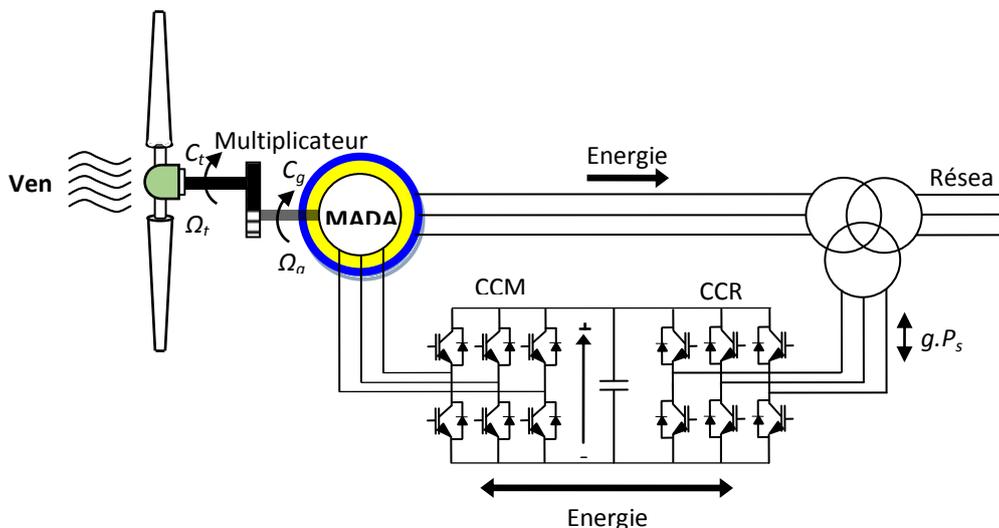


Fig. 1 Système de conversion éolienne à base de la MADA.

En premier temps on va modéliser chaque partie mécanique de l'aérogénérateur "turbine" à vitesse variable pour pouvoir extraire le maximum de la puissance

mécanique qu'on peut exploiter du vent, sachant que le model du vent qu'on va utiliser est réel comme on peut le voir par la suite, puis l'utilisation de certaines stratégies mécaniques adaptable à notre système à vitesse variable qui entraîne une génératrice spéciale "*la génératrice asynchrone a double alimentation*"

Ensuite, nous présentons la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique par le bais de la MADA. Le fonctionnement de celle-ci sera alors succinctement décrit, puis la MADA avec son convertisseur de puissance associé seront modélisés dans le repère de Park. Les différents éléments de la chaîne de conversion électromécanique de l'éolienne ont été simulés sous MATLAB/SIMULINK.

### 2. MODELE DU VENT

Le vent est le mouvement au sein d'une atmosphère, masse de gaz située à la surface d'une planète, d'une partie de ce gaz. Les vents sont globalement provoqués par un réchauffement inégalement réparti à la surface de la planète provenant du rayonnement stellaire (énergie solaire) et par la rotation de la planète. Sur Terre, ce déplacement est essentiel à l'explication de tous les phénomènes météorologiques. Le vent est mécaniquement décrit par les lois de la dynamique des fluides, comme les courants marins. Il existe une interdépendance entre ces deux circulations de fluides.

Les vents sont généralement classifiés selon leur ampleur spatiale, leur vitesse (ex : échelle de beaufort), leur localisation géographique, le type de force qui les produit et leurs effets. La vitesse du vent est mesurée avec un anémomètre mais peut être estimée par une manche à air, un drapeau, etc.

Le vent est l'acteur principal de l'oxygénation des océans ainsi que des lacs de haute montagne, par agitation de leurs surfaces. Il permet le déplacement de nombreux agents organiques et minéraux et d'expliquer la formation de certaines roches sédimentaires (ex: Lœss<sup>1</sup>). Il influence le déplacement des populations d'insectes volants, la migration des oiseaux, il façonne la forme des plantes et participe à la reproduction de certains végétaux. L'érosion éolienne participe parfois à la morphologie du relief local (ex: congère de neige, dunes). Le vent a inspiré dans les civilisations humaines de nombreuses mythologies ayant influencé le sens de l'histoire. Il a influé sur les transports, voire les guerres, mais également fourni des sources d'énergie pour le travail purement mécanique (ex. : moulins à vent, éoliennes) et pour l'électricité.

Le vent fait le plus souvent référence aux mouvements de l'air dans l'atmosphère terrestre. Par extension, le mouvement de gaz ou de particules polarisées allant

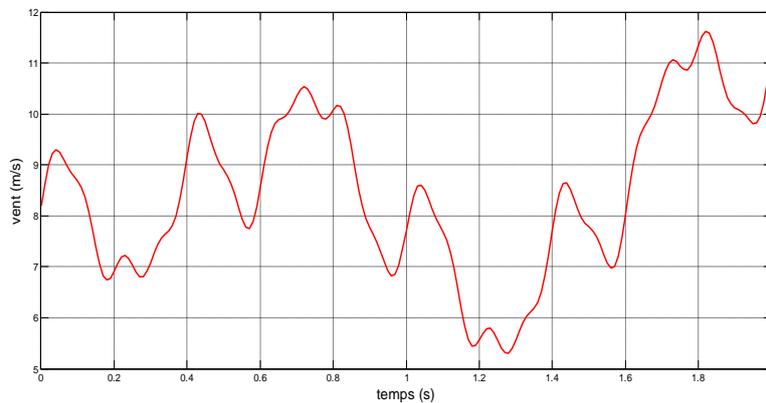
du soleil vers l'espace extérieur est appelé vent solaire et l'échappement gazeux de particules légères d'une atmosphère planétaire vers l'espace est nommé le vent planétaire.

Dans cette étude, nous avons représenté l'évolution de la vitesse du vent par une fonction scalaire qui évolue dans le temps, modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques, conformément à [20] [21] :

$$V_{\text{vent}}(t) = 8.2 + 2\sin(\omega t) - 1.75\sin(3\omega t) + 1.5\sin(5\omega t) - 1.25\sin(10\omega t) + \sin(30\omega t) + 0.5\sin(50\omega t) + 0.25\sin(100\omega t) \quad (\text{III.1})$$

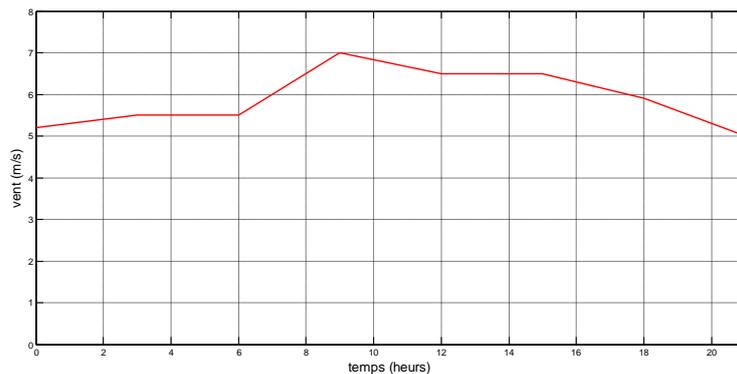
Avec :  $\omega = \frac{2\pi}{10}$

La figure 2 représente le profil du vent simulé avec une vitesse moyenne de 8.2m/s.



*Fig. 2 Simulation du profil de la vitesse du vent.*

L'évolution des moyennes annuelles de la vitesse du vent tri-horaire du site d'Adrar dans cette étude est représentée en figure 3. Cette évolution de la vitesse montre, d'une part, une diminution de la vitesse moyenne durant la nuit et une augmentation durant la journée, et d'autre part que le site d'Adrar est plus venté l'après midi que la matinée [22].



*Fig. 3 Simulation du profil de la vitesse du vent site Adrar.*

### 3. MODELISATION DE LA TURBINE EOLIENNE

#### 3.1. L'ENERGIE DISPONIBLE DANS LE VENT (THEORIE DE BETZ)

Une éolienne ne peut exploiter toute l'énergie contenue dans le courant d'air qui la traverse. En 1926, le physicien allemand Albert Betz a prouvé qu'une éolienne ne peut récupérer au maximum que  $(16/27)$  de l'énergie contenue dans le vent.

Nous considérons que le flux d'air qui va traverser la surface balayée par les pales est assimilé à un tube (une veine de vent) considérons le système éolien à axe horizontal représenté à la figure 5 dans le chapitre 1 ou on a représenté la vitesse du vent  $V_1$  en amont de l'aérogénérateur et la vitesse en  $V_2$  aval.

Désignons par  $V$  la vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur, par  $S_1$  et  $S_2$  les sections amont et aval du tube d'air et par  $S$  la surface balayée par l'hélice [37].

La production d'énergie se fait par prélèvement d'énergie cinétique à la traversée de l'aérogénérateur. En réalité la totalité de la vitesse du vent n'est pas utilisée pour faire tourner les pales, puisque le vent continu à souffler  $V_2$  après avoir traversé l'aérogénérateur. Nous pouvons dire que pendant une seconde, le volume d'air déplacé est égal à la surface de la section du tube (surface balayée par les pales)  $S$ , multiplie par la vitesse  $V$  [45].

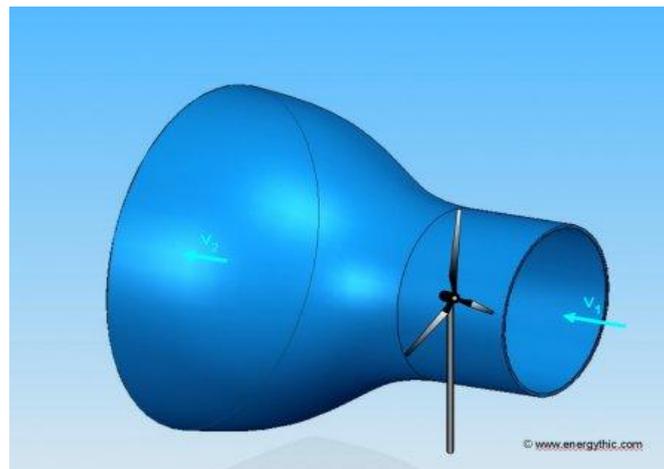


Fig. 4 Veine de vent a la traversée de l'aéromoteur.

La masse d'air en amont de l'éolienne est donc égal à [39] :

$$m_1 = \rho \cdot S_1 \cdot V_1 \quad (\text{III.2})$$

Avec :  $\rho$  la densité de l'air

L'égalité qui traduit l'incompressibilité de l'air et la permanence de l'écoulement s'écrit:

$$S_1 V_1 = S \cdot V = S_2 V_2 \quad (\text{III.3})$$

On peut donc dire que :

$$m_1 = m_2 = m \quad (III.4)$$

L'énergie cinétique contenue en amont de l'éolienne est donc donnée par l'expression suivante :

$$E_1 = \frac{1}{2} m V_1^2 \quad (III.5)$$

De la même manière, l'énergie contenue dans la même masse de vent ralentie à la vitesse  $V_2$  est égale à :

$$E_2 = \frac{1}{2} m V_2^2 \quad (III.6)$$

L'énergie cinétique perdue par cette masse de vent est celle qu'a été transformé énergie mécanique (la rotation des pales rotor) :

$$E_r = E_1 - E_2 \quad (III.7)$$

Et on a

$$E_r = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_2^2) \quad (III.8)$$

Si nous considérons maintenant que la masse d'air franchit le rotor de l'éolienne à une vitesse moyenne de  $\frac{V_1 + V_2}{2}$  l'expression de cette masse devient :

$$m = \frac{1}{2} \rho S (V_1 + V_2) \quad (III.9)$$

En réinjectant l'expression (III.8) dans celle de l'énergie captée par le rotor (III.7), nous aboutissons à :

$$E_r = \frac{1}{4} \rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2) \quad (III.10)$$

Nous avons maintenant à notre disposition la valeur de l'énergie captée par le rotor, en fonction des vitesses en amont et en aval du rotor de notre éolienne.

Finalement, le rapport entre la puissance extraite par la turbine éolienne et la puissance disponible en amont est appelé coefficient de puissance  $C_p$ , il est exprimé par [38]:

$$\frac{P_t}{P_m} = \frac{E_r}{P_m} = \frac{1}{2} \left[ 1 - \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right] \left[ 1 - \left( \frac{V_2}{V_1} \right) \right] \quad (\text{III.11})$$

La figure 5 présente la variation du coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse de vent.

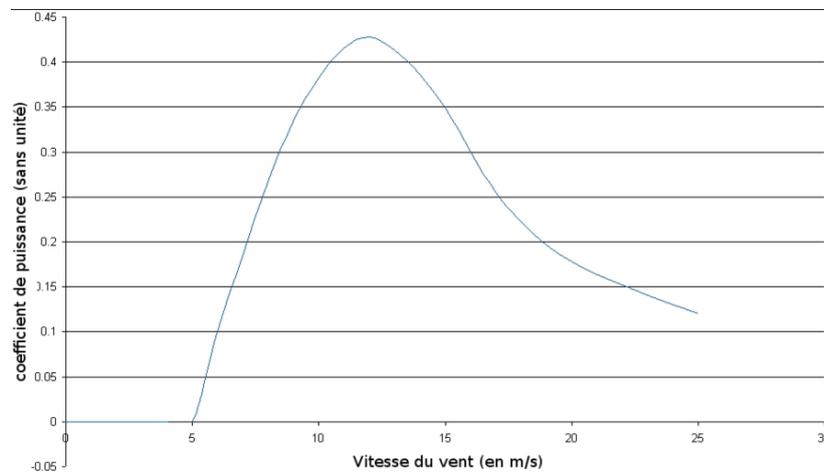


Fig. 5 Coefficient de puissance.

En représentant la caractéristique correspondante à l'équation (III.11), on s'aperçoit que  $C_p$  présente un maximum égal à  $16/27$  ; soit 0,59 appelée limite de Betz. Cette limite fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée, mais en réalité, elle n'est jamais atteinte [37] [38].

On introduit une variable sans dimension appelée vitesse spécifique  $\lambda$  pour caractériser les performances aérodynamiques d'une éolienne. Chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  représentent le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pâles de l'éolienne et la vitesse du vent (Fig. 5).

L'énergie éolienne provient de l'énergie cinétique du vent. En effet, si nous considérons une masse d'air,  $m$ , qui se déplace avec la vitesse  $v$ , l'énergie cinétique de cette masse est donnée par :

$$E_c = \frac{1}{2} m V_{\text{vent}}^2 \quad (\text{III.12})$$

Si, pendant l'unité de temps, cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface  $S$ , située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance instantanée fournie serait, alors:

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V_{\text{vent}}^3 \quad (\text{III.13})$$

Avec :

S : la surface d'aire balayée par les pales (m<sup>2</sup>);

$\rho$  : la masse volumique de l'air, en général elle est égale 1.225 kg/m<sup>3</sup> à la pression atmosphérique à 15o C;

$V_{vent}$  : vitesse du vent (m/s).

L'aérogénérateur ne pourra jamais extraire la totalité de cette énergie, à cause de la vitesse non nulle des masses d'air derrière le dispositif de conversion [50].

### 3.2. MODELE AERODYNAMIQUE DES PALES

Pour modéliser les pales de notre turbine nous avons admet un certains nombre d'hypothèses simplificatrices, qui sont le plus couramment considérées [35][46].

- ♦ Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc la même inertie, la même élasticité et le même coefficient de frottement par rapport à l'air ;
- ♦ Les trois pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support ;
- ♦ La répartition de la vitesse du vent est uniforme sur toutes les pales, et donc une égalité de toutes les forces de poussée ;
- ♦ Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est négligeable ;
- ♦ La vitesse de la turbine étant très faible, donc les pertes par frottement de la turbine sont négligeable par rapport aux pertes par frottement du coté de la génératrice.

L'aérogénérateur récupère une fraction de la puissance du vent  $P_v$  et la puissance aérodynamique  $P_t$  apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors [35][46] :

$$P_t = C_p P_v = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (III.14)$$

Où  $C_p(\lambda, \beta)$  est le coefficient de puissance ou de performance qui représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. La vitesse relative  $\lambda$  (en anglo-saxon tip speed ratio) est définie comme étant le rapport entre la vitesse linéaire des pales ( $\Omega_t R$ ) et la vitesse du vent comme suit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V_{vent}} \quad (III.15)$$

Le coefficient de puissance pour des éoliennes à rotation rapide à 3 pâles basée sur des données expérimentales. [39] s'expression par:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \exp\left( \frac{-21}{\lambda_i} \right) + 0.0068\lambda \quad (\text{III.16})$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (\text{III.17})$$

Où  $\Omega_t$  (rad/s) est la vitesse mécanique de l'arbre de la turbine.

Le couple exercé par le vent sur l'arbre de la turbine (ou couple mécanique à la sortie de la turbine) est défini par :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 C_c(\lambda, \beta) \quad (\text{III.18})$$

Où  $C_c$  représente le coefficient du couple :

$$C_c = \frac{C_p}{\lambda} \quad (\text{III.19})$$

On a utilisé l'équation (III.16) sous l'environnement MATLAB pour visualiser l'évolution du coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  pour quelques angles de calage  $\beta$ .

Le coefficient de puissance augmente chaque fois que le ratio de vitesses  $\lambda$  augmente jusqu'à une valeur maximal puis il se diminue et on remarque que  $C_p$  peut prendre une valeur négative qui provoque une inversion de l'écoulement de puissance sur l'arbre de la turbine ceci signifie qu'à partir d'une certaine vitesse de rotation de la turbine, et pour une vitesse de vent donnée, la turbine se retrouve en mode "propulsion" et fonctionne comme un ventilateur.

On remarque pour chaque angle de calage  $\beta$  il existe une valeur maximal du coefficient  $C_p$  pour un ratio de vitesses  $\lambda$  optimal. Par exemple pour un angle de calage  $\beta = 0^\circ$  coefficient  $C_p$  passe par un maximum  $C_{p-\max} = 0.48$  et une valeur du ratio de vitesse optimal  $\lambda_{\text{opt}} = 8.1$ .

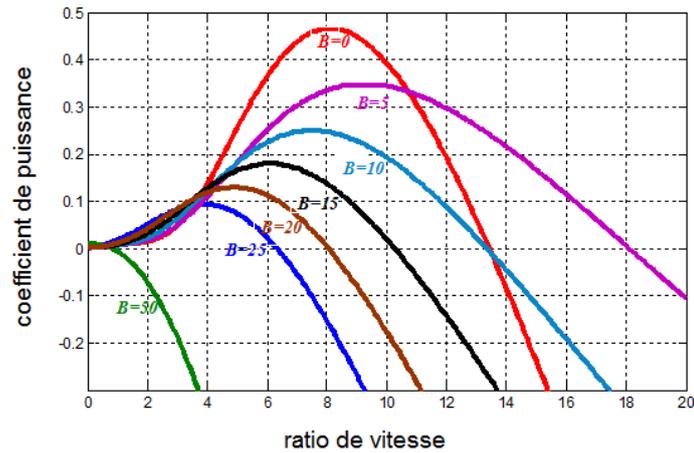


Fig. 6 L'évolution coefficient de puissance  $C_p$

### 3.3. MODELE DE LA PARTIE MECANIQUE

La figure 7 représente le model mécanique de la turbine éolienne qui est constituer de trois pales de longueur  $R$ . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation  $\Omega_t$ , relié à un multiplicateur de gain  $G$ , qui entraîne la génératrice électrique à une vitesse  $\Omega_g$  [35][46].

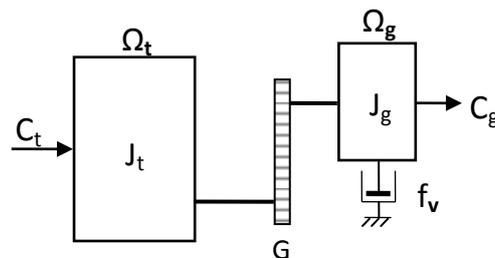


Fig. III-7 Modèle mécanique de la turbine éolienne.

Avec :

$J_t$  : Le moment d'inertie de la turbine équivalent aux inerties des 3 pales de l'éolienne,

$J_g$  : Le moment d'inertie de la génératrice,

$f_v$  : Le coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice,

$C_g$  : Le couple mécanique sur l'arbre de la génératrice après multiplicateur,

$\Omega_g$  : La vitesse de rotation de la génératrice.

$G$  : Le gain du multiplicateur de vitesse.

Le multiplicateur raccorde l'arbre lent et adapte sa vitesse de rotation de la turbine à la vitesse de rotation de la génératrice (arbre rapide). Ce multiplicateur est décrit par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_t}{G} \tag{III.20}$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_g}{G} \tag{III.21}$$

D'après la figure 7, nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la génératrice par :

$$\left( \frac{J_t}{G^2} + J_g \right) \frac{d\Omega_g}{dt} + f_v \cdot \Omega_g = C_g - C_{em} \tag{III.22}$$

Avec  $C_{em}$  le couple électromagnétique de la génératrice.

Le schéma bloc de la figure 8 représente le model mathématique. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation  $\Omega_g$  de la génératrice, donc de la turbine, peut être contrôlée par action soit sur l'angle de calage des pales  $\beta$ , soit sur le couple électromagnétique  $C_{em}$  de la génératrice. La vitesse du vent  $V$  est considérée comme une entrée perturbatrice au système [13][17].

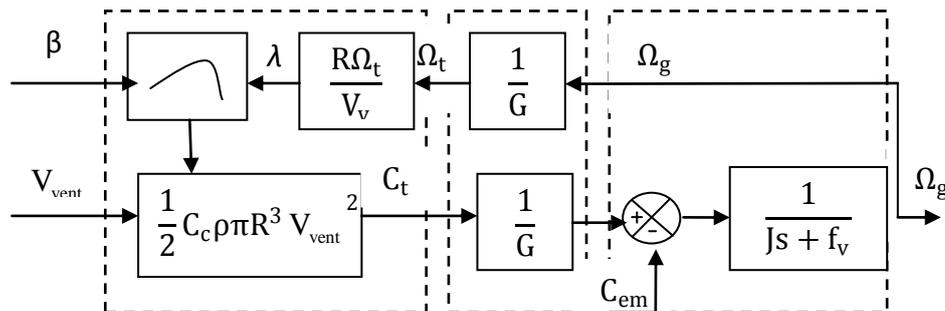


Fig .8 Schéma bloc du modèle de la turbine.

#### 4. STRATEGIE DE COMMANDE DE LA TURBINE EOLIENNE

##### 4.1. EXTRACTION DU MAXIMUM DE LA PUISSANCE DU VENT

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéresserons au fonctionnement, d'une éolienne à vitesse variable, représenté sur la figure 9.

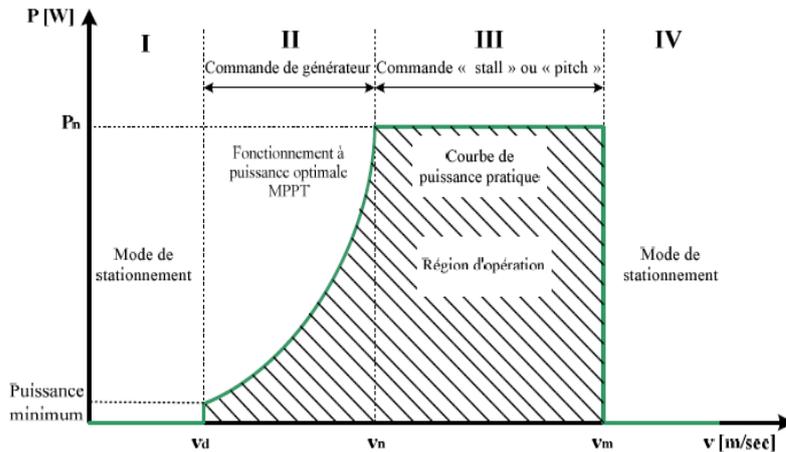


Fig. 9 Zones de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable [35].

Les objectifs de la régulation mécanique sont d'assurer l'extraction du maximum de la puissance du vent et la sécurité de l'éolienne contre le vent trop fort. Quatre zones principales de fonctionnement peuvent être distinguées. Nous allons développer une loi de contrôle pour chaque zone de fonctionnement.

- ♦ La zone I, la vitesse du vent est trop faible par rapport à la vitesse nominale  $V_{vent} \ll V_n$ . La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est négligeable ( $P=0$ ) on n'utilise aucune lois de control pour cette zone.

- ♦ La zone II, une fois que la vitesse du vent atteint une vitesse du démarrage minimale  $V_d$  (cut-in), à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie. Selon les constructeurs,  $V_d$  varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale  $V_n$  correspondant aux valeurs nominales de la puissance mécanique  $P_d$  et de la vitesse de rotation  $\Omega_n$ , dans ce cas on va développer une stratégie de commande pour contrôler le couple électromagnétique de la GADA afin de régler la vitesse de rotation de manière à maximiser la puissance électrique produite. Ce principe est connu sous la terminologie MPPT. On peut distinguer deux modes de contrôle [41] :

Le contrôle avec asservissement de la vitesse de rotation ;

Le contrôle sans asservissement de la vitesse de rotation.

L'angle de calage des pales  $\beta$  est maintenu constant à sa valeur minimale (généralement  $\beta=0^\circ$ ). Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

- ♦ La zone III, correspond aux vitesses de vent élevées supérieures à la vitesse nominale pour les quelles la vitesse de rotation de la turbine est limitée à une valeur maximale pour limiter la puissance  $P$  fournie par l'éolienne égale à la puissance nominale  $P_n$ , en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader le rendement de

l'éolienne (augmentation de l'angle de calage des pales  $\beta$ ) Le système à calage ou à pas variable « Pitch control ».

♦ La zone IV, Afin de ne pas subir de dégâts dès que le vent a atteint sa valeur maximale  $V_m$  (cut-off), une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée pour que la turbine ne convertit plus l'énergie éolienne les pales de la turbine sont mises en drapeaux ( $\beta=90^\circ$ ). Pour la grande majorité des éoliennes  $V_m = 25\text{m/s}$  .

#### **4.2. REGULATION DU SYSTEME A CALAGE "PITCH CONTROL"**

Le système à calage ou à pas variable « pitch control » est utilisé dans la zone 3 (Fig.9) on va développer une loi de régulation pour l'angle de calage pour limiter la puissance  $P$  fournie par l'éolienne.

L'angle du vent relatif par rapport au plan de rotation de l'hélice se calcule de la manière suivante [17] [49] :

$$\delta = \arctan \frac{\Omega_r R}{V_{\text{vent}}} \quad (\text{III.23})$$

La relation qui permet d'obtenir l'angle d'incidence  $\alpha$  du vent relatif qui attaque le profil de la pale  $s$  »exprime par :

$$\alpha = \delta + \beta \quad (\text{III.24})$$

L'angle de calage des pâles  $\beta$  est adapté en permanence afin de maximiser le rendement de l'hélice afin d'obtenir un système de conversion d'énergie le plus efficace possible

Pour une hélice le rendement dépend directement du rapport portance/trainée du profil de ses pâles ce rapport varie en fonction de l'angle d'incidence du vent relatif  $\alpha$  comme le montre la figure 10 on remarque que le rapport est maximum pour un angle d'incidence  $\alpha$  de  $7.5^\circ$

$C_x$  Coefficient de trainée

$C_z$  Coefficient de portance

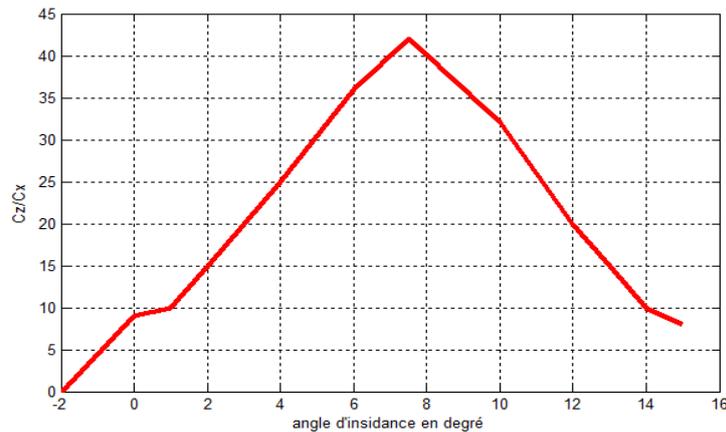


Fig. 10 Coefficient de portance/trainée on fonction de l'angle d'incidence .

Il faut maintenir  $\alpha$  à sa valeur optimale quelles que soient les conditions de fonctionnement pour garder le rendement maximum, ainsi on mesure l'angle du vent relatif et l'on détermine l'angle de calage  $\beta$  de telle sorte que l'angle d'incidence  $\alpha$  reste optimal en permanence [35] [47] [48].

On peut déterminer l'angle de calage optimal  $\beta_{opt}$  par l'équation suivante

$$\beta_{opt} = \delta - \alpha_{opt} = \delta - 7.5 \tag{III.25}$$

La figure 11 représente le schéma bloc de contrôle de l'angle de calage  $\beta$

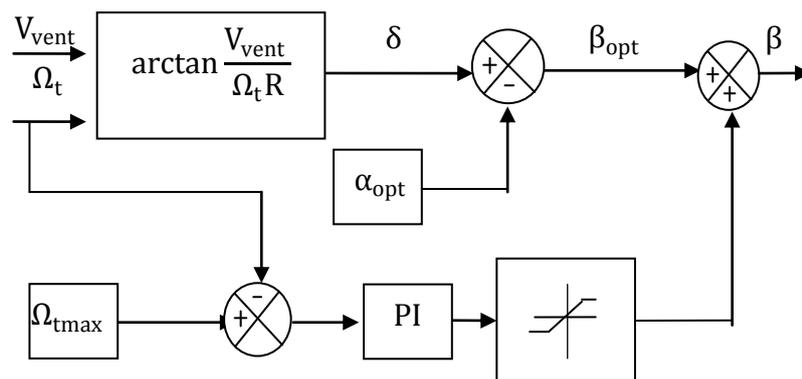


Fig. 11 Schéma bloc du control du l'angle de calage  $\beta$ .

### 4.3. STRATEGIE DE MAXIMISATION DE PUISSANCE "MPPT"

On va développer une stratégie de commande (Fig.9) pour la zone II, dans ce cas là on doit maximiser la puissance en exploitant le mieux l'énergie disponible dans le vent. Ces systèmes de contrôle utilisent différents moyens afin d'obtenir ce point de puissance maximum (MPPT en anglais Maximum Power Point Tracking), dans cette partie deux méthode vont être étudiées Contrôle MPPT avec et sans asservissement de la vitesse mécanique

*4.3.1. Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation avec régulation classique PI [42] [23]*

MPPT avec asservissement de vitesse de rotation de la génératrice GADA c'est maintenir la vitesse de rotation de cette génératrice  $\Omega_g$  à une vitesse de référence  $\Omega_g^*$  pour réguler le couple électromagnétique, alors le couple électromagnétique développé par la GADA est donc à tout instant égal à sa valeur de référence imposée par la commande.

La vitesse de référence  $\Omega_g^*$  est maximisée si le coefficient de couple  $C_p$  est optimiser pour cela il faut optimiser la vitesse relative  $\lambda$ .

Le couple électromagnétique développé par la GADA est égal à sa valeur de référence imposée par la commande.

$$C_{em} = C_{em}^* \quad (III.26)$$

Avec :

$C_{em}^*$  le couple électromagnétique de référence de la GADA.

Et la dérivée de la vitesse de la génératrice s'écrit

$$\frac{d\Omega_g}{dt} = \frac{1}{J} (C_g - f_v \cdot \Omega_g - C_{em}) \quad (III.27)$$

Où  $J$  est l'inertie totale de l'ensemble « turbine + génératrice », donnée par  $J = \left( \frac{J_t}{G^2} + J_g \right)$

Le couple électromagnétique de référence  $C_{em}^*$  permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence  $\Omega_g^*$  est obtenu par une relation inverse indirecte :

$$C_{em}^* = R_{\Omega} (\Omega_g^* - \Omega_g) \quad (III.28)$$

Avec :

$R_{\Omega}$  : le régulateur de vitesse ;

$\Omega_g^*$  : la vitesse mécanique de référence.

La vitesse mécanique de référence  $\Omega_g^*$  peut être calculée par la vitesse de référence de la turbine  $\Omega_t^*$

$$\Omega_g^* = G \cdot \Omega_t^* \quad (III.29)$$

Pour un point de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe), on souhaite que la puissance mécanique soit maximale, ce qui correspond à la valeur maximale du coefficient  $C_p$ . Celle-ci est obtenue si la vitesse relative  $\lambda$  est égale à sa valeur optimale  $\lambda_{opt}$  (pour  $\beta$  constant et égal à  $2^\circ$ ).

La vitesse de rotation de référence de la turbine  $\Omega_t^*$  est obtenue à partir de l'équation (III.15) comme suit :

$$\Omega_t^* = \frac{\lambda_{opt} \cdot V_v}{R} \tag{III.30}$$

Le schéma de principe du contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique de rotation est montré à la figure 12.

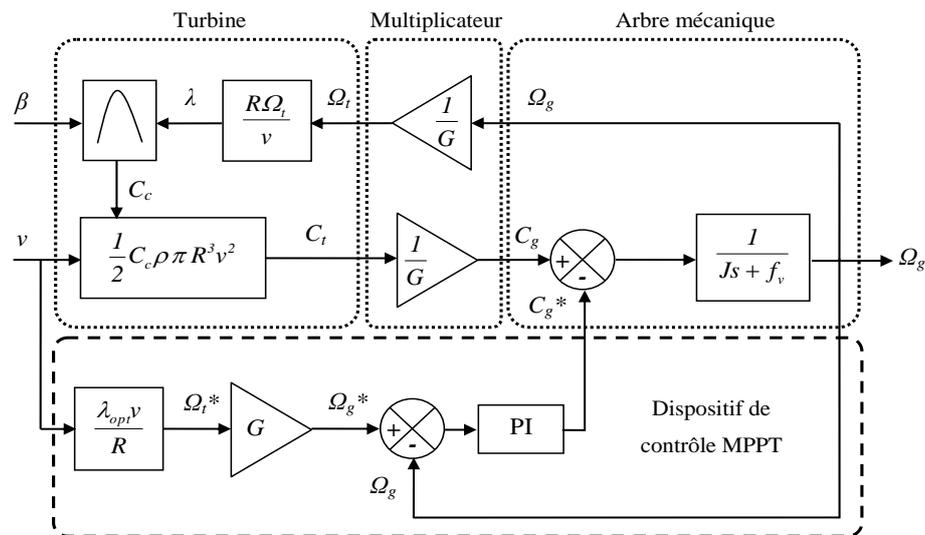


Fig. 12 Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.

a) Synthèse du régulateur classique PI

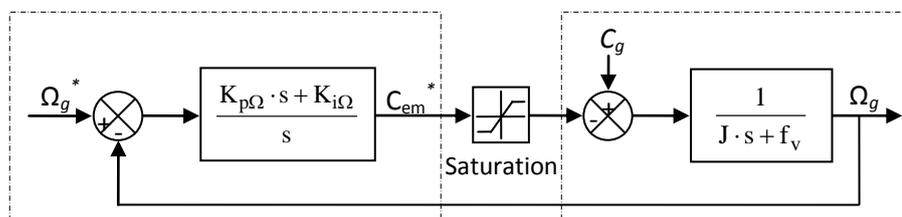


Fig. 13 Schéma bloc de régulation de la vitesse de rotation.

On va utiliser dans cette partie le régulateur proportionnel intégrateur (PI) pour contrôler. Dans l'objectif d'annuler l'erreur statique et réduire le temps de réponse tout en conservant la stabilité du système, on utilise une limitation de la référence

du couple à la sortie du correcteur pour annulée tout dépassement du couple qui peut nuire au fonctionnement du système.

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit :

$$\Omega_g = F(s) \cdot \Omega_g^* + G(s) \cdot C_g \quad (III.31)$$

D'où  $F(s)$  est la fonction de transfert de la référence sur la vitesse :

$$F(s) = \frac{K_{p\Omega} \cdot s + K_{i\Omega}}{J \cdot s^2 + (f_v + K_{p\Omega})s + K_{i\Omega}} \quad (III.32)$$

Et  $G(s)$  est la fonction de la perturbation :

$$G(s) = \frac{s}{J \cdot s^2 + (f_v + K_{p\Omega})s + K_{i\Omega}} \quad (III.33)$$

Pour baisser l'effet de la perturbation (couple  $C_{em}$ ), nous avons intérêt à choisir une valeur élevée pour le gain  $K_{p\Omega}$ . L'autre gain est choisi de manière à avoir une fonction de transfert du 2ème ordre, ayant une pulsation naturelle et un coefficient d'amortissement, déterminés comme suit :

$$\begin{cases} \omega_{n,1} = \sqrt{\frac{K_{i\Omega}}{J}} \\ \xi_{-1} = \frac{f_v + K_{p\Omega}}{J \cdot 2\omega_{n,1}} \end{cases} \quad (III.34)$$

Pour imposer un temps de réponse et un facteur d'amortissement, nous trouvons :

$$\begin{cases} K_{i\Omega} = \omega_{n,1}^2 \cdot J \\ K_{p\Omega} = 2\xi_{-1} J \omega_{n,1} - f_v \end{cases} \quad (III.35)$$

#### 4.3.2. Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse de rotation [23] [42]

MPPT sans asservissement est utilisé quand la vitesse du vent varie très peu en régime permanent devant les constantes de temps électriques du système éolien, le couple d'accélération de la turbine est nul. Cette stratégie ne dépend plus du vent il dépend directement de la vitesse de rotation de la génératrice pour calculer une vitesse optimal de la turbine pour développer un couple de la génératrice optimal.

Nous pouvons écrire l'équation suivante :

$$\frac{d\Omega_g}{dt} \left( \frac{J_t}{G^2} + J_g \right) + f_v \cdot \Omega_g = C_g - C_{em} = 0 \quad (III.36)$$

On néglige l'effet du couple dû aux frottements visqueux  $f_v \cdot \Omega_g = 0$  par rapport au couple mécanique  $C_g$ , on peut alors écrire :

$$C_g = C_{em} \quad (III.37)$$

À partir de la mesure de la vitesse de rotation de la GADA on peut estimer  $\hat{\Omega}_t$ , la vitesse de rotation de la turbine, par l'équation suivante:

$$\hat{\Omega}_t = \frac{\Omega_g}{G} \quad (III.38)$$

On peut estimer  $\hat{V}_{vent}$  à partir de l'estimation de la vitesse rotation de la turbine, par l'équation suivante :

$$\hat{V}_{vent} = \frac{\hat{\Omega}_t R}{\lambda_{opt}} \quad (III.39)$$

Le couple de la turbine éolienne peut ensuite être obtenu à partir des estimations de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation de la turbine. Il peut être s'exprimer par :

$$\hat{C}_t = \frac{1}{2} C_c^{max} \rho \pi R^3 \hat{V}_{vent}^2 \quad (III.40)$$

Afin d'extraire le maximum de puissance, il faut fixer la vitesse relative à sa valeur optimale  $\lambda_{opt}$  afin d'obtenir le coefficient de puissance maximum  $C_c^{max}$ . Le couple électromagnétique de référence s'exprime donc par :

$$\hat{C}_t^* = \frac{1}{2\lambda_{opt}^2} C_c^{max} \rho \pi R^5 \hat{\Omega}_t^2 \quad (III.41)$$

Le couple électromagnétique de référence est alors obtenu à partir de l'estimation du couple de la turbine éolienne :

$$\hat{C}_t = \frac{1}{2} C_c^{max} \rho \pi R^3 \left( \frac{\hat{\Omega}_t R}{\lambda_{opt}} \right)^2 \quad (III.42)$$

$$C_{em}^* = \frac{\hat{C}_t}{G} \quad (III.43)$$

La figure (14) présente le principe du contrôle MPPT de la turbine éolienne sans asservissement de la vitesse de rotation.

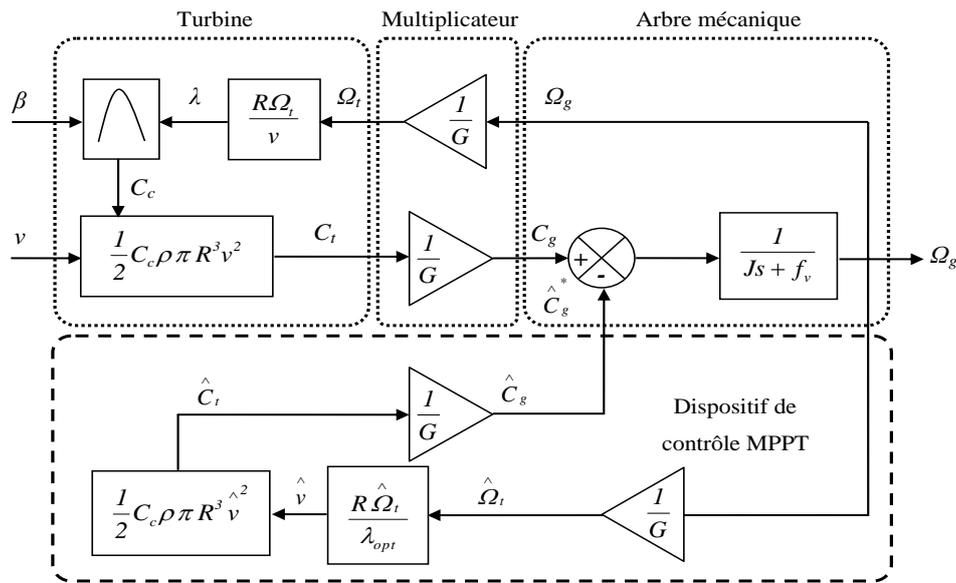


Fig. 14 Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique.

#### 4.4. RESULTAT DE SIMULATION

Les figures 15, 16, 17 et 18 présentent les résultats de simulation avec logiciel MATLAB/SIMULINK de la vitesse mécanique, coefficient de puissance et le ratio de vitesse du système éolien sans et avec les deux stratégies de contrôles MPPT étudiées précédemment. Soumise au vent dont son profil temporel est donné par la figure 2 puis au vent d'un profil horaire donné par la figure 3.

Les résultats de simulation pour les deux modes de control MPPT montre l'optimisation du coefficient de puissance et l'optimisation de ces deux paramètre a une valeur maximal alors une optimisation de la puissance aérodynamique et la vitesse de rotation de la génératrice contre la variation de la vitesse du vent (changement de vent temporaire et horaire a Adrar) pour l MPPT avec asservissement montrent des performances statiques et dynamiques très satisfaisante, une poursuite de la consigne contrôlée (vitesse de rotation de la génératrice) et un temps de réponse souhaitable par le régulateur PI. Et pour l MPPT sans asservissement la figure.17 montre une erreur égale presque zéro entre le couple électromagnétique mesuré et estimé de la MADA.

Finalement, les résultats obtenus pour les deux stratégies de contrôle MPPT (avec et sans-asservissement de vitesse) montrent de bonnes performances statiques et dynamiques, un temps de réponse souhaitable offert par les deux techniques ; ce qui justifie le choix de la méthode MPPT pour le contrôle de la turbine, mais pour MPPT avec asservissement une mesure erronée de la vitesse conduit forcément à une

dégradation de la puissance captée selon la stratégie de commande précédente alors pour MPPT sans asservissement l'inconvénient principal est tout de même que la dynamique du système en boucle fermée ne compense pas la dynamique du système mécanique, ce qui conduit à une réponse relativement lente du système par rapport à des variations du vent. Ce qui nous donne pas l'avantage de réguler la vitesse de la génératrice.

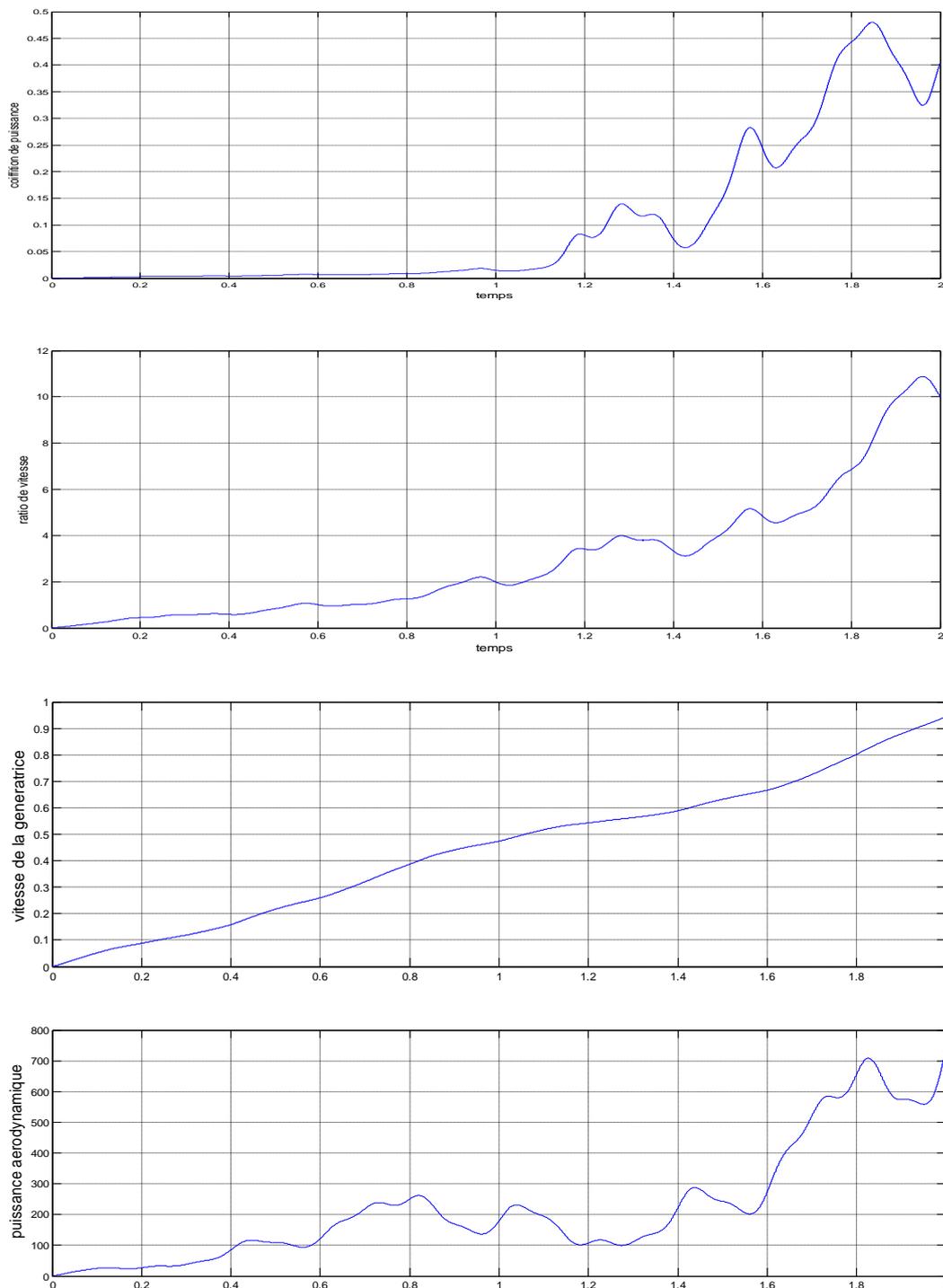


Fig.15 Résultat de simulation sans MPPT.

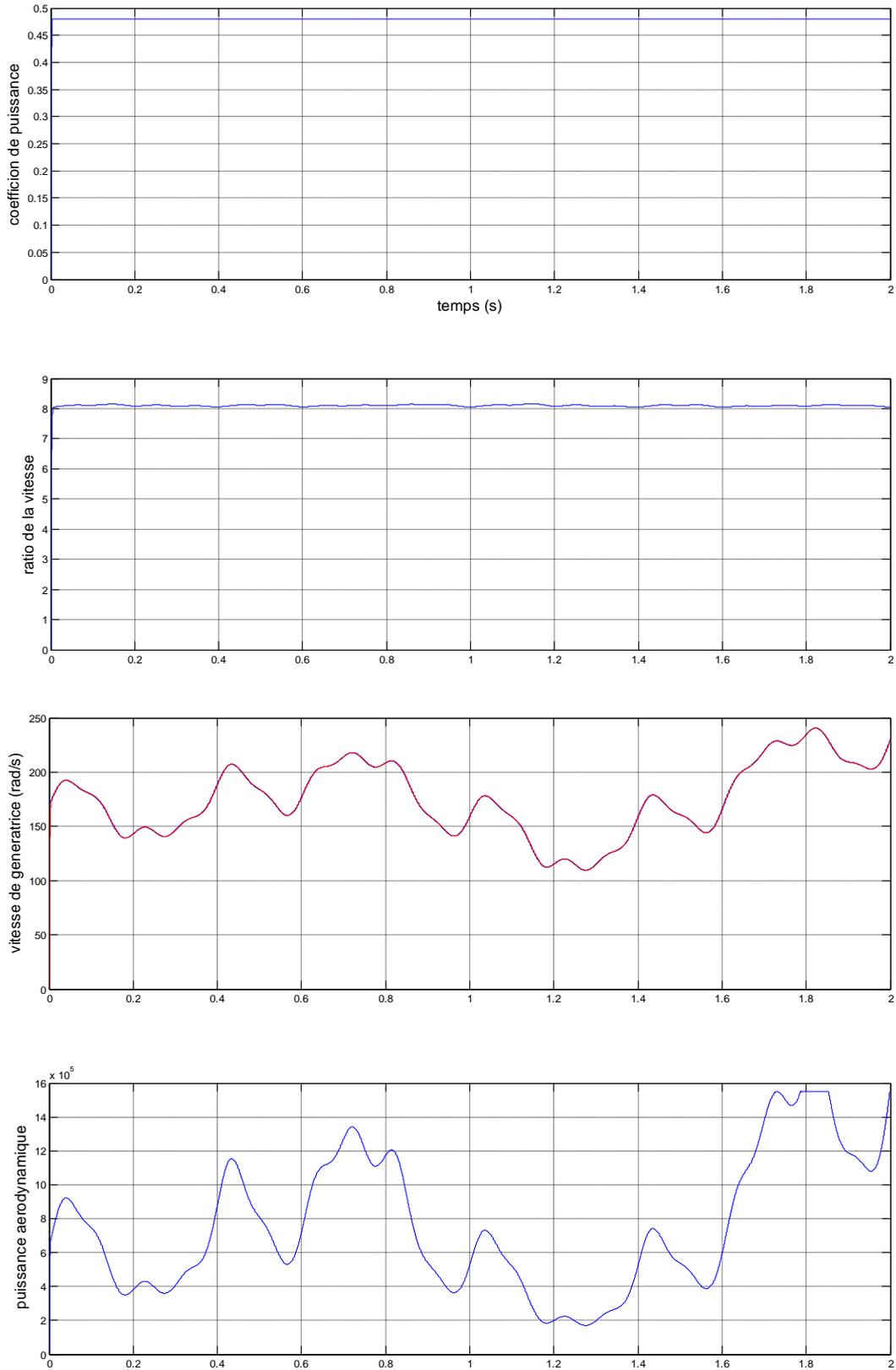


Fig.16 Résultat de simulation contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.

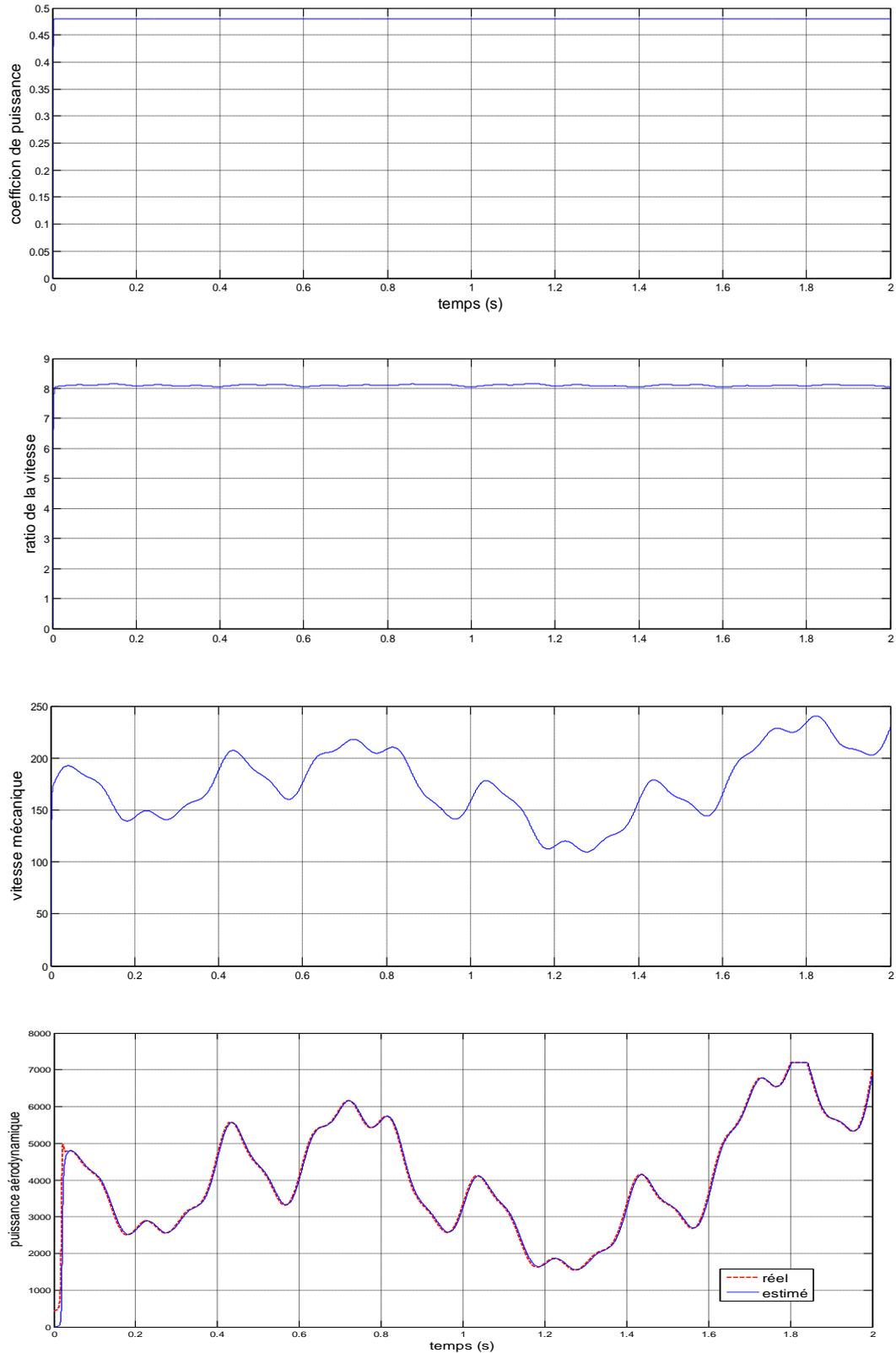


Fig. 17 Résultat de simulation contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique.

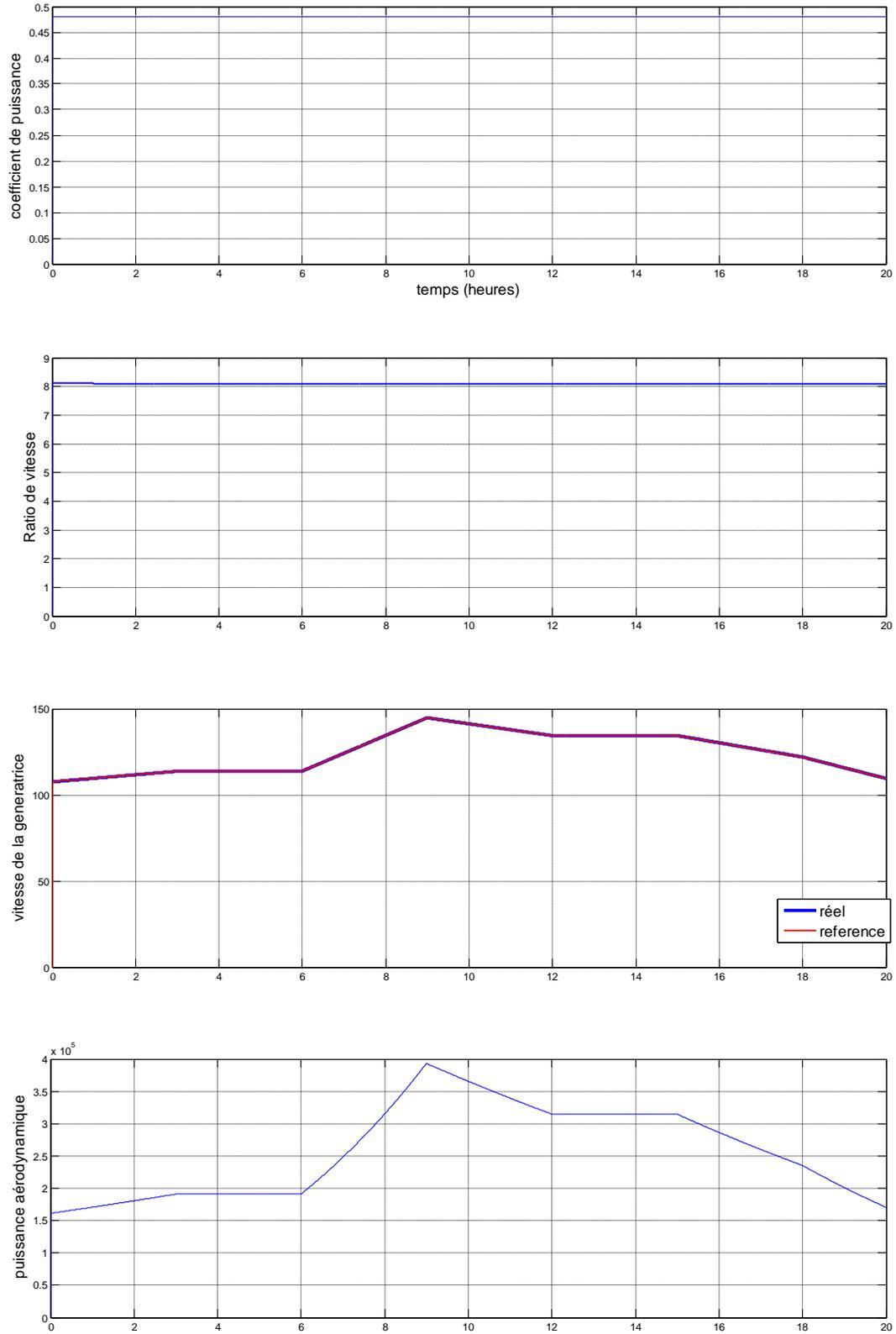


Fig.18 Résultat de simulation contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique gisement de vent Adrar.

## PARTIE 2: PARTIE ELECTRIQUE

### 5. MODELISATION DE LA MADA

Après la modélisation de la partie mécanique nous consacrons la partie suivante pour la modélisation de la partie électrique " la génératrice ", le choix de cette dernière doit satisfaire certains critères. La MADA machine asynchrone double alimentation montre plusieurs propriétés avantageuses pour l'utilisation dans notre système éolien à vitesse variable pour une production optimale de l'électricité parce qu'elle nous permet d'avoir une plage de vitesse de rotation variant de  $\pm 30\%$  autour de la vitesse de synchronisme, même l'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir une grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique, et par conséquent pour bien contrôler le transfert des puissances active et réactive. L'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Cette machine est la plus utilisée dans les systèmes éoliens grâce à ses quatre modes de fonctionnement [vue au chapitre II] et grâce son prix compétitive et sa grande robustesse. Le système de conversion éolien basé sur une MADA est bien expliqué dans figure 1.

Dans cette section nous allons développer une modélisation mathématique de la génératrice MADA que nous avons choisie dans le chapitre II pour pouvoir la commander et mieux exploiter sa puissance fournie, cette section est inspirée des travaux de Maxwell qui a développé le modèle mathématique de la machine asynchrone par des équations différentielles reliant les paramètres électriques qui découlent des équations de Maxwell.

#### 5.1. HYPOTHESE SIMPLIFICATRICES

On repose sur des hypothèses simplificatrices classiques suivantes pour modéliser notre GADA:

- ♦ L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable.
- ♦ La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- ♦ Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau.

♦ On admet que la f.m.m créée par chacune des phases des deux armatures est à répartition sinusoïdale.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut citer :

- ♦ L'additive des flux.
- ♦ La constante des inductances propres.
- ♦ La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

### 5.2. MODELE DE LA MADA DANS LE REPERE TRIPHASÉ

La figure 19 représente le schéma d'une machine triphasée asynchrone à double alimentation dans le repère triphasé. Le stator est constitué de trois enroulements répartis dans l'espace, et séparés d'un angle électrique de  $120^\circ$ , les mêmes propos s'appliquent au rotor qu'il soit à cage d'écureuil ou formé de trois bobines.

Dans le repère triphasé, les trois vecteurs  $s_a$ ,  $s_b$ ,  $s_c$ , sont orientés selon les axes des trois enroulements statoriques de la machine. Il est de même pour le rotor [17] [35].

L'axe  $s_a$  est souvent considéré comme référence et l'angle  $\theta$  définit la position du rotor par rapport au stator.

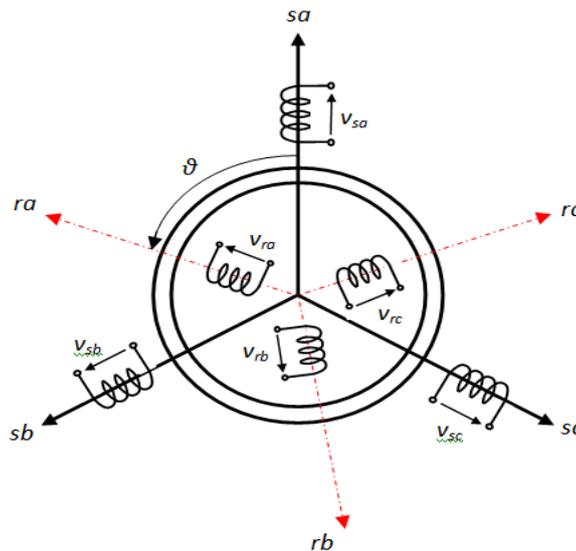


Fig.19 Représentation spatiale des enroulements de la MADA

En tenant compte des hypothèses simplificatrices précédentes, les équations des circuits électriques font intervenir des inductances propres et mutuelles permettant de définir les flux en fonction des courants. Elles se présentent sous la forme matricielle comme suit :

Au stator :

$$[\Phi_s]_{3 \times 1} = [L_s]_{3 \times 3} [I_s]_{3 \times 1} + [L_m]_{3 \times 3} [I_r]_{3 \times 1} \quad (III.44)$$

Au rotor :

$$[\Phi_r]_{3 \times 1} = [L_r]_{3 \times 3} [I_r]_{3 \times 1} + [L_m]_{3 \times 3} [I_s]_{3 \times 1} \quad (III.45)$$

Savons que:

$$[L_s]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix}; \quad [L_r]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix}; \quad (III.46)$$

Et on a aussi :

$$[L_m]_{3 \times 3} = [m_{rs}]_{3 \times 3}^T = [m_{sr}]_{3 \times 3} = M \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (III.47)$$

Avec :

$[\Phi_s]_{3 \times 1} = [\varphi_{sa}, \varphi_{sb}, \varphi_{sc}]^T$  : Vecteur des flux instantanés des phases a, b et c statoriques ;

$[\Phi_r]_{3 \times 1} = [\varphi_{ra}, \varphi_{rb}, \varphi_{rc}]^T$  : Vecteur des flux instantanés des phases a, b et c rotoriques ;

$[I_s]_{3 \times 1} = [i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}]^T$  : Vecteur des courants instantanés des phases a, b et c statoriques ;

$[I_r]_{3 \times 1} = [i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}]^T$  : Vecteur des courants instantanés des phases a, b et c rotoriques ;

Et :

$[\Phi_s]_{3 \times 1} = [\varphi_{sa}, \varphi_{sb}, \varphi_{sc}]^T$  : Vecteur des flux instantanés des phases a, b et c statoriques ;

$L_s$  et  $L_r$  : Les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la MADA, respectivement ;

$L_m$  : L'inductance mutuelle cyclique entre le stator et le rotor (inductance magnétisante) ;

$l_s$  et  $l_r$  : Les inductances propres statoriques et rotoriques ;

$m_s$  et  $m_r$  : Les inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques de la MADA, respectivement ;

$m_{sr}$  et  $m_{rs}$  : Les inductances mutuelles entre deux phases statorique-rotorique, et entre deux phases rotorique-statorique de la MADA, respectivement ;

$M$  : Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique ;

$\theta$  : L'angle électrique entre une phase statorique et une autre rotorique.

On a :

$$\begin{cases} L_s = l_s - m_s \\ L_r = l_r - m_r \\ L_m = \frac{3}{2}M \end{cases} \quad (III.48)$$

Le couplage magnétique décrit par les équations est utilisé pour déduire les équations des tensions des circuits statorique et rotorique (loi de Faraday), dès lors, on peut écrire:

Sachant que stator :

$$[V_s]_{3 \times 1} = [R_s]_{3 \times 3} [I_s]_{3 \times 1} + \frac{d}{dt} [\Phi_s]_{3 \times 1} \quad (III.49)$$

Et le rotor :

$$[V_r]_{3 \times 1} = [R_r]_{3 \times 3} [I_r]_{3 \times 1} + \frac{d}{dt} [\Phi_r]_{3 \times 1} \quad (III.50)$$

Où :

$$[R_s]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} ; \quad [R_r]_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} ; \quad (III.51)$$

Avec :

$R_s$  et  $R_r$  : Les résistances des enroulements statoriques et rotoriques de la MADA, respectivement.

### **5.3. MODELE DE LA MADA DANS LE REPERE BIPHASE**

Afin de rechercher les lois de contrôle d'une machine à courant alternatif, nous pouvons la modéliser dans un repère biphasée (d,q) tournant dont l'orientation est à priori arbitraire. Ce modèle est obtenu après transformation virtuelle de la machine triphasée en machine diphasée équivalente (transformation de Park) [35] [43].

$$[P(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (III.52)$$

La transformé inverse de parque est :

$$[P(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1 \end{bmatrix} \quad (III.53)$$

La transformée de Park permet de réduire la complexité des systèmes d'équations 45, 46, 46 et 47. Elle consiste à remplacer les trois phases statoriques et rotoriques du système triphasé par un système diphasé (d-q-o) constitué des grandeurs équivalentes d'axe d et q et une composante homopolaire qui n'est pas pris en compte dans le modèle de la machine. Une matrice P(Θ) de PARK permet le passage des composantes X<sub>abc</sub> du système triphasé aux composantes X<sub>dq</sub> du système biphasé, ce système tourne à une vitesse qui dépend des grandeurs statoriques ou rotoriques.

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et flux un changement de variables faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et l'axe du repère de Park (d-q-o). Pour réaliser cette transformation algébrique on utilise les matrices de Park directe équation (III.52) et inverse (III.53) [41][50]. Les grandeurs statoriques et rotoriques sont exprimées dans un repère comme le montre la figure 20.

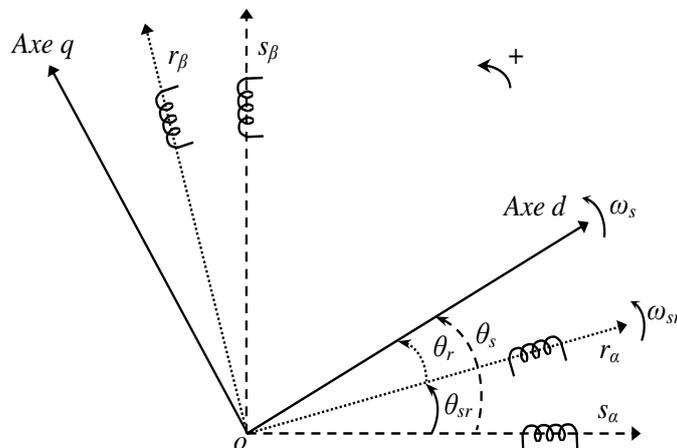


Fig.20 Repères de référence statorique (αs-βs), rotorique (αr-βr) et tournant (dq).

La figure 20 montre l'existence de trois types d'angle électrique rotorique  $\theta_r$ , statorique  $\theta_s$  et glissement  $\theta_{sr}$  quelles produisent respectivement les vitesses de pulsation rotorique  $\omega_r$ , statorique  $\omega_s$  et de glissement  $\omega_{sr}$  de la MADA.

Ces trois types d'angle électrique sont très importants pour le choix de l'orientation du repère de Park dont nous allons voir l'utilisation de chaque angle dans sont cas naturel:

- ♦ Référentiel lié au rotor ( $\theta=\theta_r$ ) : ce choix est très utilisé dans l'étude des régimes transitoires.
- ♦ Référentiel lié au stator ( $\theta=0$ ) : c'est le repère naturel ou stationnaire ( $\alpha-\beta$ ) de la MADA. Ce choix permet de simplifier la transformation de Park en celle de Clarke dans le cas de non conservation de puissance ou celle de Concordia dans le cas contraire. Le changement de repère triphasé/biphasé (a-b-c)/( $\alpha-\beta$ ) peut être réalisé par la transformation de Clarke (voir annexe C). Ce référentiel est très souvent utilisé dans l'étude des observateurs.
- ♦ Référentiel lié au champ tournant statorique ( $\theta=\theta_s$ ) : ce choix permet d'avoir une pulsation de glissement et s'adapte parfaitement à la commande vectorielle par orientation du flux statorique que nous présenterons ultérieurement. Les axes sont désignés par (d-q).

Si l'on applique ces transformations aux flux et tensions intervenant dans les équations de la MADA, nous obtenons le modèle diphasé de celle-ci qui s'écrit sous la forme [17][35][43]:

Les équations des tensions statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} - \omega_s \varphi_{sq} \\ v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{sq} + \omega_s \varphi_{sd} \\ v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d}{dt} \varphi_{rd} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rq} \\ v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d}{dt} \varphi_{rq} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{rd} \end{cases} \quad (III.54)$$

Les équations des flux statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \varphi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad (III.55)$$

Les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques s'expriment par :

$$\begin{cases} P_s = \text{Re} \left\{ \overline{V}_s \times \overline{I}_s^* \right\} = (v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq}) \\ Q_s = \text{Im} \left\{ \overline{V}_s \times \overline{I}_s^* \right\} = (v_{sq} i_{sd} - v_{sd} i_{sq}) \end{cases} \quad (\text{III.56})$$

$$\begin{cases} P_r = \text{Re} \left\{ \overline{V}_r \times \overline{I}_r^* \right\} = (v_{rd} i_{rd} + v_{rq} i_{rq}) \\ Q_r = \text{Im} \left\{ \overline{V}_r \times \overline{I}_r^* \right\} = (v_{rq} i_{rd} - v_{rd} i_{rq}) \end{cases} \quad (\text{III.57})$$

Il nous reste maintenant à décrire l'équation mécanique de la machine sous la forme :

$$C_{em} = C_r + f_v \cdot \Omega + J_g \cdot \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{III.58})$$

Avec :

$C_{em}$  : le couple électromagnétique ;

$C_r$  : le couple résistant ;

$f_v$  : le coefficient de frottement visqueux de la GADA ;

$\Omega$  : la vitesse de rotation de l'axe de la GADA ;

$J_g$  : l'inertie des parties tournantes de la GADA.

Les équations suivantes sont équivalentes et permettent de calculer le couple électromagnétique :

$$\begin{cases} C_{em} = \frac{pL_m}{L_s L_r - L_m} (\phi_{rd} \phi_{sq} - \phi_{rq} \phi_{sd}) \\ C_{em} = \frac{pL_m}{L_s} (I_{rd} \phi_{sq} - I_{rq} \phi_{sd}) \\ C_{em} = pL_m (I_{rd} I_{sq} - I_{rq} I_{sd}) \\ C_{em} = \frac{pL_m}{L_r} (\phi_{rd} I_{sq} - \phi_{rq} I_{sd}) \end{cases} \quad (\text{III.59})$$

Avec :

$p$  : le nombre de paires de pôles de la GADA.

#### 5.4. MODELE DE LA MADA DANS LE REPERE BIPHASE AVEC ORIENTATION DU FLUX STATORIQUE

Pour mieux commander notre génératrice asynchrone double alimentation, Nous utilisons la modélisation diphasée de la machine en orientant le repère (d, q) afin que l'axe d soit aligné sur le flux au champ tournant statorique, lequel est relatif à la

fréquence de 50Hz, alors le repère de Park sera synchronisé avec le flux statorique (Fig.21)[17] [35] [43].

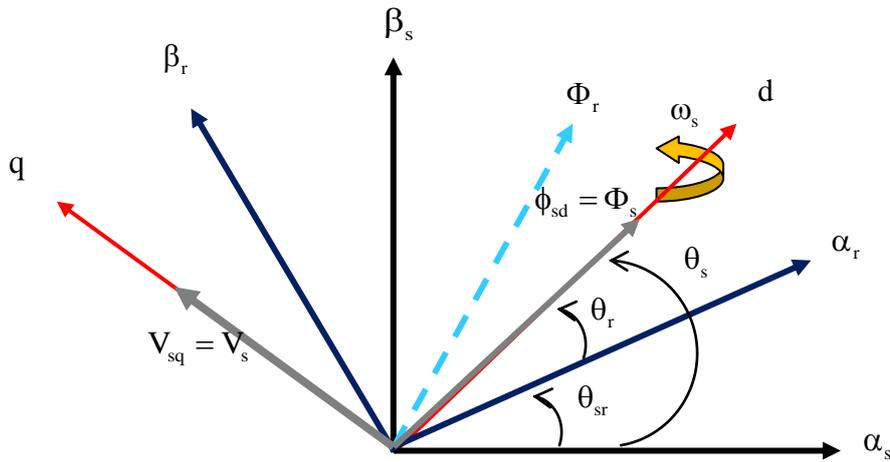


Fig.21 Orientation de l'axe d sur le flux statorique.

La figure 21 représente l'orientation de l'axe d sur le flux statorique et nous supposons que le réseau est stable, on peut déduire que le flux statorique alors :

$$\begin{cases} \varphi_{sq} = 0 \\ \varphi_{sd} = \Phi_s \end{cases} \quad (III.59)$$

$$\begin{cases} v_{sd} = 0 \\ v_{sq} = V_s = \omega_s \Phi_s \end{cases} \quad (III.60)$$

$$\begin{cases} \Phi_s = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ 0 = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \end{cases} \quad (III.61)$$

Le couple électromagnétique est directement proportionnel au courant rotorique en quadrature  $I_{rq}$  de l'équation 61 s'écrit alors :

$$C_{em} = -p \frac{L_m}{L_s} I_{rq} \Phi_{sd} \quad (III.62)$$

Et de l'équation (III.61), (III.56) on obtient :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ 0 = L_s I_{sd} + M I_{rq} \end{cases} \quad (III.63)$$

A partir de l'équation (III.61), nous pouvons alors écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} i_{sd} = \frac{\Phi_s}{L_s} - \frac{L_m}{L_s} i_{rd} \\ i_{sq} = -\frac{L_m}{L_s} i_{rq} \end{cases} \quad (III.64)$$

En remplaçant dans l'équation des flux (III.57), les courants statoriques par l'expression (III.67) on obtient :

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = \sigma L_r i_{rd} + \frac{L_m}{L_s} \Phi_s \\ \Phi_{rq} = \sigma L_r i_{rq} \end{cases} \quad (III.65)$$

Avec :  $\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$  (coefficient de dispersion de Blondel).

En remplaçant l'expression des flux rotoriques de l'équation précédente (III.65) par leurs expressions dans l'équation (III.13), on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{rd} - g \omega_s \sigma L_r i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{d}{dt} i_{rq} + g \omega_s \sigma L_r i_{rd} + g \frac{L_m V_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.66)$$

Les dérivées des courants rotoriques diphasés s'annulent en régime permanent alors  $V_{rd}$   $V_{rq}$  nous pouvons donc écrire sachant que (g) est le glissement de la machin asynchrone:

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} - g \omega_s \sigma L_r i_{rq} \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + g \omega_s \sigma L_r i_{rd} + g \frac{L_m V_s}{L_s} \end{cases} \quad (III.67)$$

L'équation (III.70) fait apparaitre un terme  $\left( \frac{g L_m V_s}{L_s} \right)$  représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car elle entraîne une erreur de traînage. Le contrôle du système devra donc prendre en compte cette erreur.

Sachant que  $v_{sd} = 0$  alors les puissances active et réactive s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} V_s i_{sq} \\ Q_s = \frac{3}{2} V_s i_{sd} \end{cases} \quad (III.68)$$

L'utilisation de l'équation des courants statoriques (III.67) dans l'équation des puissances active et réactive (III.59) nous donne l'expression suivante :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{L_m}{L_s} i_{rq} \\ Q_s = \left( V_s \frac{\Phi_s}{L_s} - V_s \frac{L_m}{L_s} i_{rd} \right) \end{cases} \quad (III.69)$$

En tirant  $\Phi_s = \frac{V_s}{\omega_s}$  l'expression de la puissance réactive devient

$$Q_s = -V_s \frac{L_m}{L_s} i_{rd} + \left( \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \right) \quad (III.70)$$

De l'équation (III.59) et (III.60) dans l'équation du couple électromagnétique de l'équation (III.62) on aura l'expression :

$$C_{em} = -p \frac{L_m V_s}{L_s \omega_s} i_{rq} \quad (III.71)$$

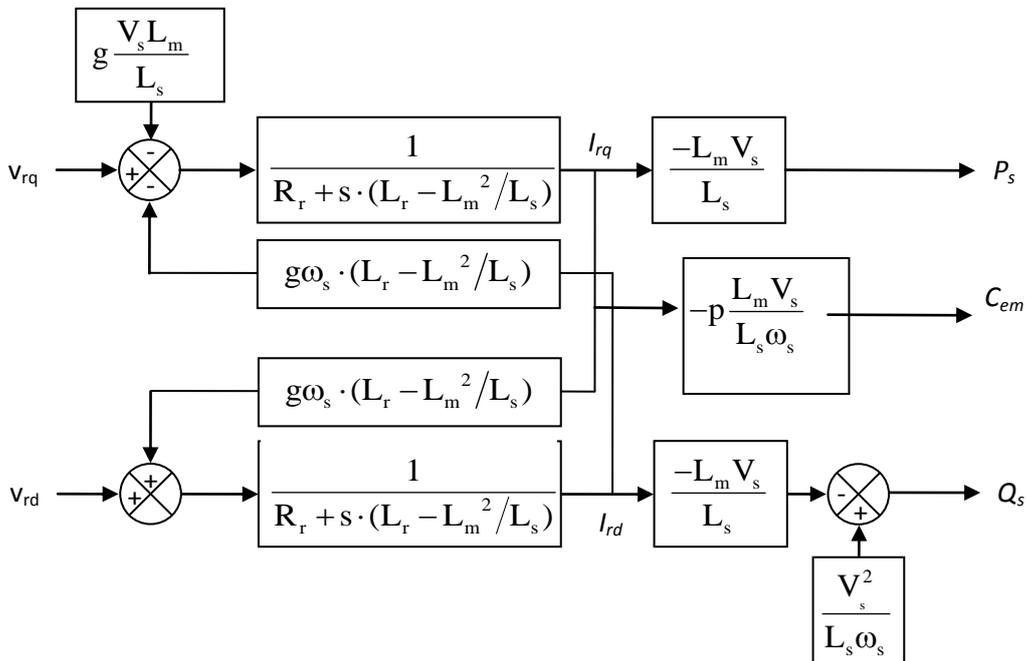


Fig.22 Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA.

Suivant les équations précédentes on peut construire le schéma bloc de la MADA illustré dans la figure 22 si dessus qui comporte en entrées les tensions rotoriques et en sorties les puissances active et réactives statoriques. On remarque l'effet du couplage entre les deux puissances active et réactive, nous allons utiliser ce model pour la commande de la GADA.

6. MODELISATION DE L'ONDULEUR

La figure 23 Représentation schématique d'un onduleur de tension alimente le rotor de la MADA. Il s'agit d'un onduleur triphasé idéal à deux niveaux de tension, modélisé par six interrupteurs parfaits à commutation instantanée et à chute de tension négligeable aux bornes, avec des commandes complémentaires [13].

Cet onduleur représente la partie clé des différent mode de commande pour contrôler les puissances active et réactive échangées avec le réseau, dans notre travail nous nous intéressons a la modélisation de la partie coté génératrice (CCR).

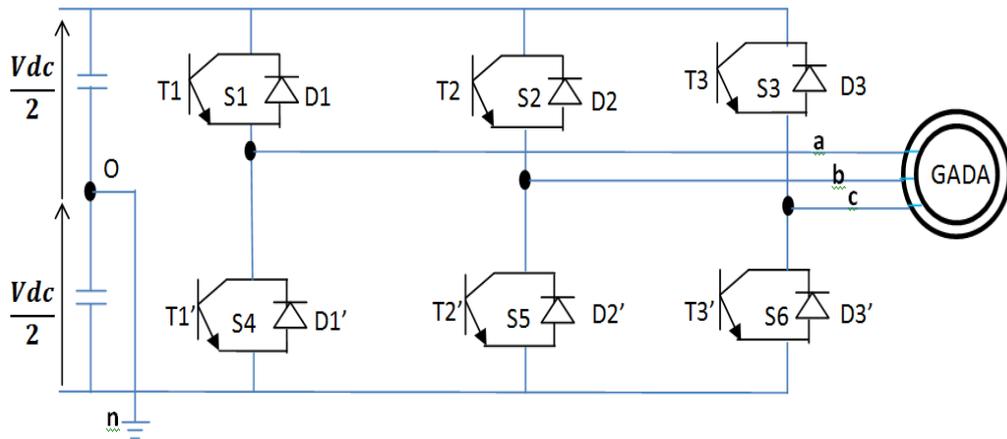


Fig.23 Représentation schématique d'un onduleur de tension alimente le rotor de la MADA.

Pour la modélisation de cet onduleur on ce base sur le Schéma équivalent d'une phase de l'onduleur représenté dans la figure 24 [44] :

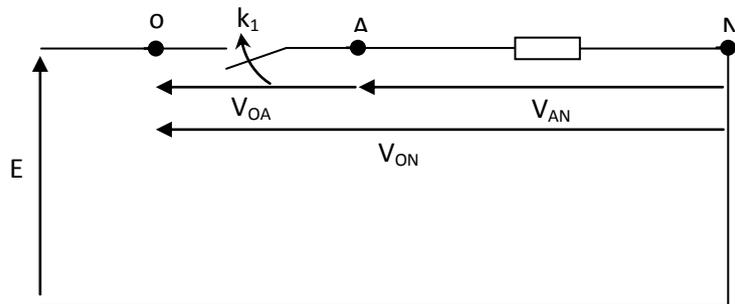


Fig.24 Schéma équivalent d'une phase de l'onduleur.

D'après le schéma équivalent en déduit :

$$\begin{cases} V_{ON} = V_{OA} + V_{AN} & \text{phase A} \\ V_{ON} = V_{OB} + V_{BN} & \text{phase B} \\ V_{ON} = V_{OC} + V_{CN} & \text{phase C} \end{cases} \quad (III.72)$$

Donc les tensions simples appliquées aux trois phases statoriques sont:

$$\begin{cases} V_{AN} = V_{AO} + V_{ON} \\ V_{BN} = V_{BO} + V_{ON} \\ V_{CN} = V_{CO} + V_{ON} \end{cases} \quad (III.73)$$

Par addition on a :

$$V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} = V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{ON} \quad (III.74)$$

Sachant que le système des tensions triphasées statoriques est équilibré et symétrique, donc :

$$V_{AN} + V_{BN} + V_{CN} = 0 \quad (III.78)$$

Par conséquent :

$$V_{AO} + V_{BO} + V_{CO} + 3V_{ON} = 0 \quad (III.75)$$

D'où :

$$V_{ON} = -\frac{1}{3}(V_{AO} + V_{BO} + V_{CO}) \quad (III.76)$$

On remplace équation 76 dans 72, on aura le système suivant :

$$\begin{cases} V_{AN} = \frac{2}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_{BN} = -\frac{1}{3}V_{AO} + \frac{2}{3}V_{BO} - \frac{1}{3}V_{CO} \\ V_{CN} = -\frac{1}{3}V_{AO} - \frac{1}{3}V_{BO} + \frac{2}{3}V_{CO} \end{cases} \quad (III.77)$$

On peut écrire le système ci-dessus sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{AO} \\ V_{BO} \\ V_{CO} \end{bmatrix} \quad (III.78)$$

Avec :

$$\begin{cases} V_{AO} = ES_1 \\ V_{BO} = ES_2 \\ V_{CO} = ES_3 \end{cases} \quad (III.79)$$

Tel que :

$$\begin{cases} S_1 = 1 & \text{si } k_1 \text{ fermé} & \text{si non } S_1 = 0 \\ S_2 = 1 & \text{si } k_2 \text{ fermé} & \text{si non } S_2 = 0 \\ S_3 = 1 & \text{si } k_3 \text{ fermé} & \text{si non } S_3 = 0 \end{cases} \quad (\text{III.80})$$

Finalement, on aura le système suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \frac{E}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{III.81})$$

Avec :  $E = U_{dc}$

En utilisant les fonctions de connexions les tensions composées de l'onduleur sont exprimées comme suit :

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{AN} - V_{BN} = (S_1 - S_2)E \\ V_{BC} = V_{BN} - V_{CN} = (S_2 - S_3)E \\ V_{CA} = V_{CN} - V_{AN} = (S_3 - S_1)E \end{cases} \quad (\text{III.82})$$

Une analyse combinatoire de tous les états possibles des interrupteurs constituant le convertisseur donne huit (23) combinaisons possibles dont six états actifs non nuls et deux restants des états de commutation nuls.

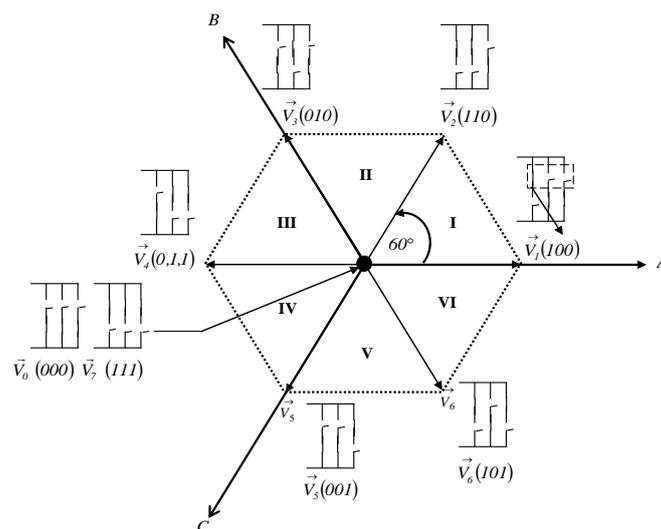


Fig.25 Les états possibles des constituants des interrupteurs de l'onduleur

### 6.1. MODULATION DE LARGEUR D'IMPULSION (MLI)

Elle consiste à convertir une modulante (tension de référence au niveau commande), généralement sinusoïdale, en une tension sous forme de créneaux successifs, générée à la sortie de l'onduleur (niveau puissance). Au niveau

électronique, son principe repose sur la comparaison de la modulante avec la porteuse (tension à haute fréquence de commutation). La valeur du rapport de fréquences entre la porteuse triangulaire (ou en dents de scie) et la modulante procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur.

Les techniques de modulation sont nombreuses, les plus utilisées sont: La naturelle, la régulière, l'optimisée (élimination des harmoniques non désirés), la vectorielle et la modulation à bande d'hystérésis.

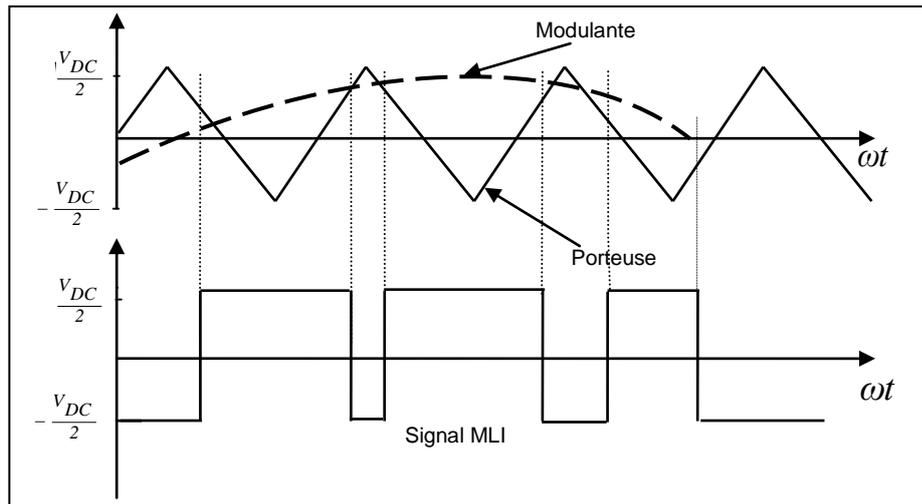


Fig.25 Principe de commande en MLI sinus-triangulaire.

L'objectif de la MLI, c'est la minimisation ou la réduction des oscillations sur la vitesse, le couple et les courants. Cela permettra de réduire la pollution du réseau électrique en harmonique, avec minimisation des pertes dans le système par conséquent augmenter le rendement.

Dans notre travail, parmi les techniques de modulation précitées la technique MLI naturelle sera utilisée en se basant sur la comparaison entre deux signaux Fig.25:

- Le premier c'est le signal de référence qui représente l'image de la sinusoïde qu'on désire à la sortie de l'onduleur, ce signal est modulable en amplitude et en fréquence.
- Le second qui est appelé signal de la porteuse définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques de l'onduleur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.

On peut régler la tension de sortie de l'onduleur en agissant sur l'indice d'amplitude  $V_{mod}$  :

$$V_{mod} = \frac{V_m}{V_p} \quad (III.83)$$

$V_p$  : valeur de crête de la porteuse.

$V_m$  : valeur maximale de la tension de référence.

Ainsi on peut agir sur l'indice de modulation  $m$  :

$$m = \frac{f_p}{f_m} \quad (III.84)$$

$f_p$  : fréquence de la porteuse.

$f_m$  : fréquence de la modulante.

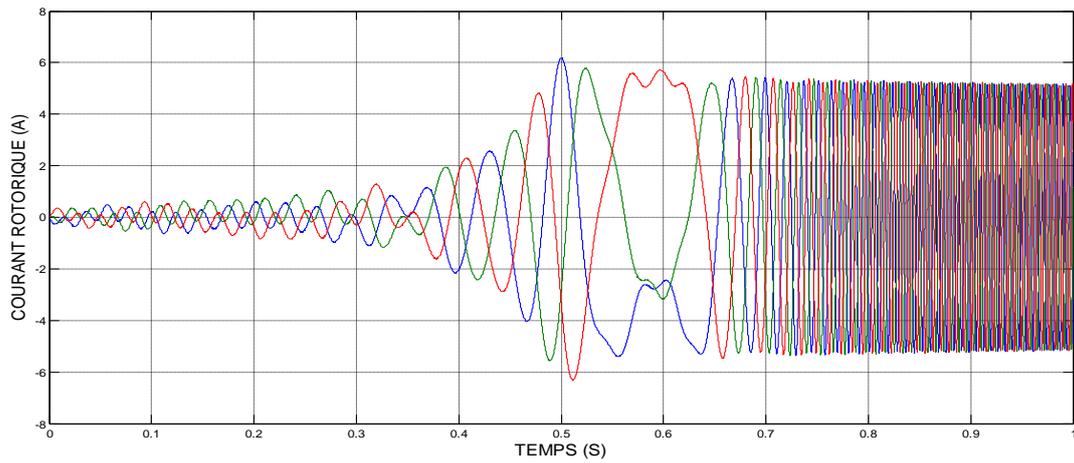
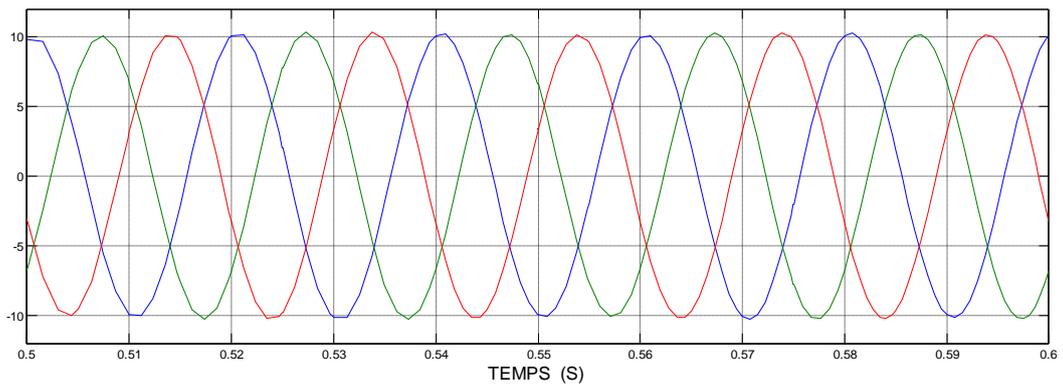
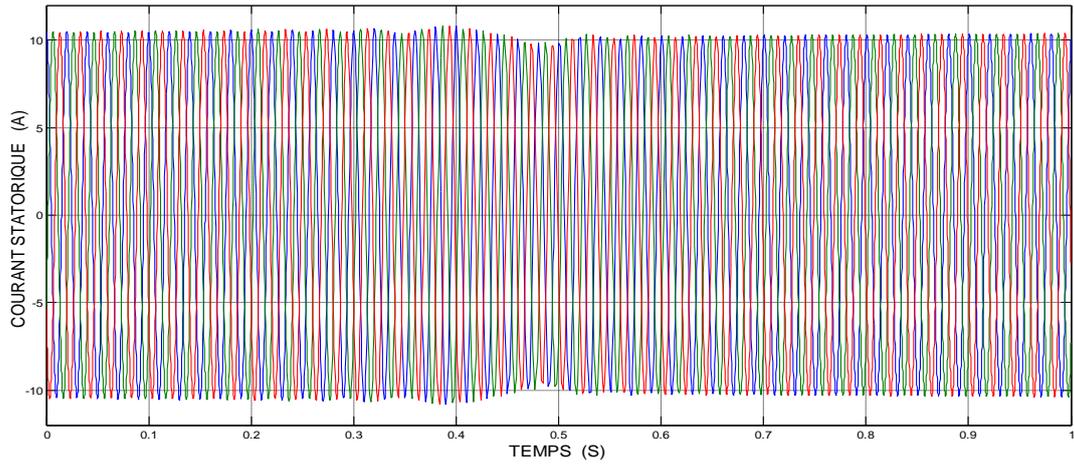
La valeur maximale de la tension fondamentale (à la sortie de l'onduleur) vaut exactement :

$$V_{1max} = \frac{V_{DC}}{2} V_{mod} \quad (III.85)$$

$V_{DC}$  : la tension continue à l'entrée de l'onduleur.

## 7. RESULTAT DE SIMULATION

La figure 26 présente les résultats de simulation avec logiciel MATLAB/SIMULINK des courants statorique et rotorique générées par notre machine entraînée par une turbine à vitesse variable soumise à un vent d'un gisement fixe, les résultats montrent que les courants statorique et rotorique sont sinusoïdales et le courant rotorique subit une légère déformation à l'instant 0.55s ce qui confirme le passage doux du mode hypo-synchrone au mode hyper-synchrone de la MADA à l'instant 0.55s.



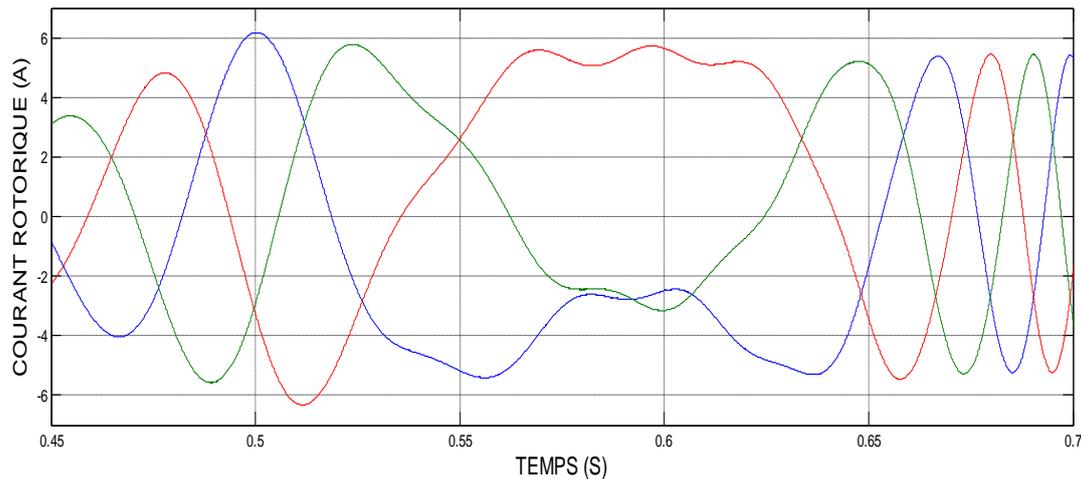


Fig.26 Résultat de simulation des courants de la MADA entraîné par la turbine.

## 8. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons modélisé notre chaîne de conversion en deux parties : mécanique et électrique. Dans la première partie nous avons choisi et modélisé deux gisements réels du vent : un d'une région française et l'autre de Adrar Algérie. Après on a étudié la partie mécanique "turbine" de l'éolienne puis on a entamé la partie modélisation.

La partie régulation du "pitch control" a montré une grande importance de la régulation mécanique du système de calage afin de maximiser le rendement de l'hélice et d'obtenir un système de conversion d'énergie le plus efficace possible.

Finalement on a pu développer une stratégie de maximisation de puissance "MPPT" sans et avec asservissement (MPPT en anglais Maximum Power Point Tracking), pour mieux exploiter et maximiser l'énergie du vent d'un gisement de vent variable, la partie simulation et faite par le logiciel MATLAB SIMULINK pour visualiser les performances de la réponse de notre turbine.

Dans la deuxième partie nous avons modélisé la partie électrique entraînée par la turbine constituée de l'onduleur et de la MADA, et nous avons développé le modèle simplifié de la MADA dans le repère de Park lié au champ tournant puis pour arriver à un modèle simplifié pour contrôler les deux puissances active et réactive cette MADA est alimenté du côté rotor par un onduleur 2 niveaux « CCR » commande par une commande MLI.

# CHAPITRE IV

## COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA

### 1. INTRODUCTION

Nous allons développer dans le chapitre IV la commande vectorielle de la génératrice double alimentée pour mieux contrôler les puissances statoriques active et réactive injectées au réseau électrique. Cette commande est abordée en deux méthodes: la commande directe et la commande indirecte.

La commande vectorielle, aussi appelée commande à flux orienté (field-oriented control en anglais), est la commande la plus utilisée dans l'industrie, c'est une méthode où on transforme les composantes électriques en deux composantes vectorielles.

K. Hasse, de l'université de Darmstadt et F. Blaschke, de l'université technique de Brunswick, sont les pères de la commande vectorielle des moteurs à courant alternatif. Le premier propose la commande vectorielle indirecte en 1968, le second propose la commande vectorielle directe en 1971 [52] [53]. Werner Leonhard, de l'université technique de Brunswick pose les bases de la commande à flux orienté et contribue à rendre les moteurs à courant alternatifs compétitifs face aux moteurs à courant continu.

Ce n'est cependant qu'avec la commercialisation des microprocesseurs dans le début des années 1980 [54] que la commande des moteurs à courant alternatif est utilisée. Au départ, la commande à flux orienté était plus coûteuse, plus complexe et moins facile à maintenir que la commande des moteurs à courant continu. En effet, les premières demandaient encore de nombreux capteurs, amplificateurs et autres composants électroniques pour leur fonctionnement.

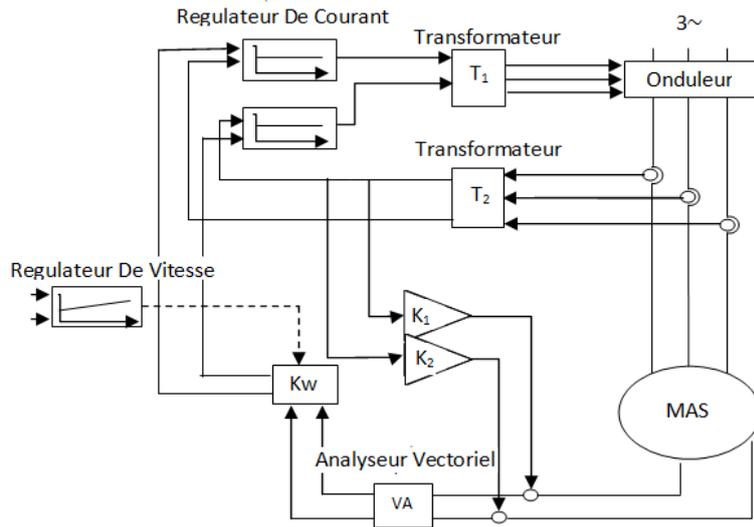


Fig.1 Schéma bloc du brevet de 1971 déposé par Blaschke [2].

## 2. STRATEGIE DE COMMANDE DE LA GADA

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances active et réactive. Pour cela on va essayer de commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur du flux (le courant d'excitation) et celle du couple (le courant d'induit). Dans notre étude on va essayer de réaliser un découplage entre la composante  $V_{rq}$  et la composante  $V_{rd}$  alors on aura un découplage entre la puissance active et la puissance réactive [55] [56] [35].

La machine à courant continu à un découplage naturel entre l'induit, alimenté par un courant d'induit  $i_a$  (génère un couple  $C_{em}$ ) et l'inducteur, excité par un courant d'excitation  $i_f$  (génère un flux).

On peut déduire de l'équation III.65 que l'expression du couple s'écrit [17] :

$$C_{em} = K_t i_a i_f$$

Nous avons vu aussi dans l'équation III.61 que le couple  $C_{em}$  s'écrit

$$C_{em} = \frac{pL_m}{L_r} (\phi_{rd} I_{sq} - \phi_{rq} I_{sd}) = p \frac{L_m}{L_s} \Phi_s i_{rq}$$

On voit que cette relation est similaire à celle d'une MCC à excitation séparée.

A l'examen de ces dernières relations, on constate que [17] [23] [35] :

- La composante  $i_{rd}$  joue le rôle du courant d'excitation qui génère et contrôle le flux d'excitation  $\Psi_r$ .

- La composante  $i_{rq}$  joue le rôle du courant induit qui, à un flux d'excitation donné, contrôle le couple  $C_{em}$ .

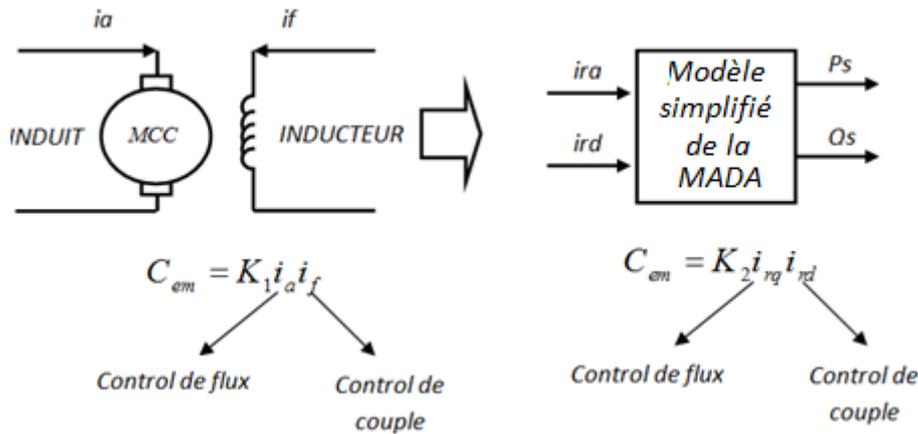


Fig.2 Stratégie de commande de la GADA

La figure 3 représente le schéma bloc simplifié de la génératrice asynchrone double alimentation où on peut remarquer l'apparition des f.e.m  $g \frac{V_s L_m}{L_s}$  et  $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$  et des termes de couplage  $g \omega_s \cdot (L_r - L_m^2 / L_s) i_{rd}$

On peut distinguer aussi deux fonctions de transfert de premier ordre chacune impose une puissance. La première fonction de transfert  $\frac{1}{R_r + s \cdot (L_r - L_m^2 / L_s)} \frac{-L_m V_s}{L_s}$  reflète la puissance active et la deuxième  $\frac{1}{R_r + s \cdot (L_r - L_m^2 / L_s)} \frac{-L_m V_s}{L_s}$  reflète la puissance réactive.

Nous allons essayer d'isoler chacune de ces deux fonctions de transfert pour pouvoir réguler indépendamment les deux puissances active et réactive.

On a deux méthodes [17] [23] [35] :

- La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et compenser les f.e.m et mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactives. Cette méthode est appelée *méthode directe* car les régulateurs de puissances contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.
- La deuxième méthode consiste compenser les f.e.m et tenir en compte les termes de couplage et les compenser en effectuant un système comportant deux

boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée *méthode indirecte* (fig.3).

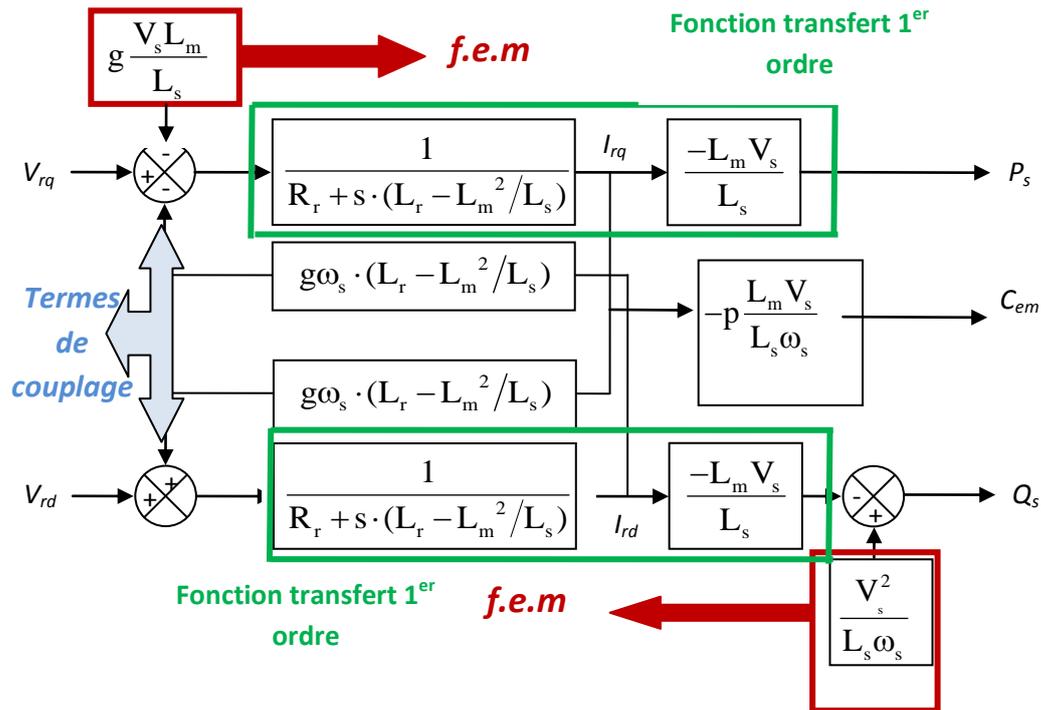


Fig.3 Schéma bloc du modèle simplifié de la MADA.

### 3. COMMANDE VECTORIELLE DIRECTE DES PUISSANCES

La mise en œuvre de cette méthode est simple, elle est directe car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotoriques de la machine.

Pour réguler la machine par cette méthode nous allons mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbation qui sont présents dans le schéma bloc de la figure (3) [23] [35] [45].

On a choisi le régulateurs PI classique (Proportionnel-Intégral) pour contrôler les puissances active et réactive (fig.4).

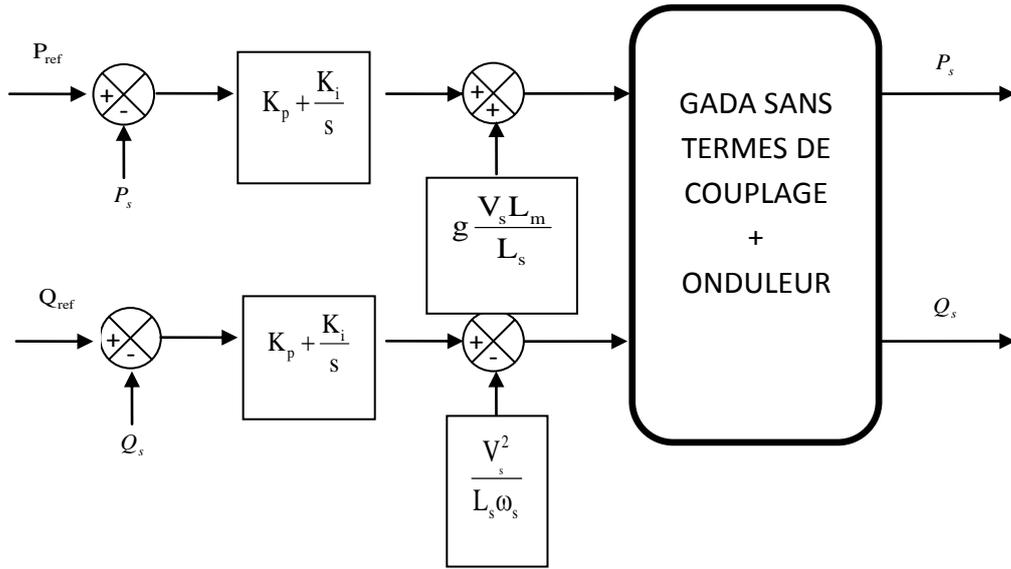


Fig.4 Schéma bloc de la commande directe de la GADA.

#### 4. COMMANDE VECTORIELLE INDIRECTE DES PUISSANCES

Le schéma bloc de la commande vectorielle indirecte des puissances est représenté dans la figure 5. Cette technique consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler. Nous construisons ainsi un schéma bloc permettant d'exprimer les tensions en fonction des puissances. Nous aboutissons alors à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens. La méthode indirecte va donc contenir tous les éléments présents dans le schéma bloc que la GADA. Nous partons donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques.

On part donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonction des courant rotoriques et on aura [23] [45] [57] :

$$V_{rd} = g\omega_s \frac{\sigma L_r}{V_s L_m} \cdot P_s - \left( \frac{R_r + \sigma L_r}{V_s L_m} p \right) \cdot Q_s + \left( \frac{R_r V_s}{\omega_s L_s} + \frac{\sigma L_r V_s}{\omega_s L_m} p \right) \quad (IV.1)$$

$$V_{rq} = - \left( \frac{R_r + \sigma L_r}{V_s L_m} p \right) \cdot P_s - g\omega_s \frac{\sigma L_r}{V_s L_m} \cdot Q_s + g\omega_s \sigma L_r \frac{V_s}{\omega_s L_m} \quad (IV.2)$$

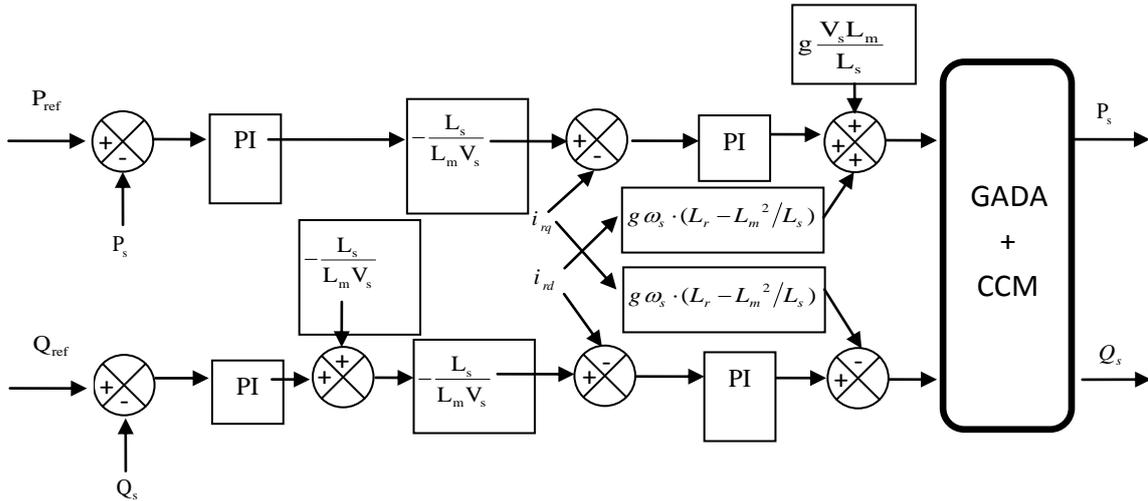


Fig.5 Schéma bloc de la commande indirecte de la GADA.

5. SYNTHÈSE DU REGULATEUR PI [23][58]

Le régulateur PI appelé aussi le correcteur PI (proportionnel intégrateur en anglais “proportionnel, intégral”) est un système de contrôle, permettant d’effectuer un asservissement en boucle fermée d’un système industriel ou « procédé ». C’est le régulateur le plus utilisé dans l’industrie et il permet de régler un grand nombre de grandeurs physiques. Le régulateur PI est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables.

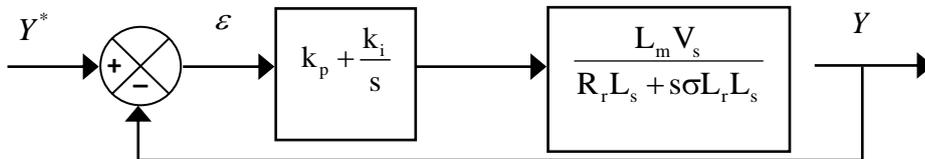


Fig.6 Schéma bloc du système régulé par un PI.

La figure 6 montre la chaîne 1 (une partie de notre système) bouclé et corrigé par un régulateur PI, correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la figure 4.

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) avec les régulateurs s’écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{s + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{s}{k_p}} \cdot \frac{\frac{3L_m V_s}{2\sigma L_r L_s}}{s + \frac{R_r L_s}{\sigma L_r L_s}} \tag{IV.3}$$

Nous choisissons la méthode de compensation des pôles pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert. Ceci nous conduit à l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s R_r}{L_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right)} \quad (IV.4)$$

La compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de notre génératrice sont connus et bien déterminés car les gains du régulateur dépend directement de ces paramètres, pour que le régulateur PI soit satisfaisant.

Après la compensation, on obtient la FTBO suivante :

$$FTBO = \frac{K_p \frac{L_m V_s}{L_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right)}}{s} \quad (IV.5)$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + s\tau_r} \quad \text{avec} \quad \tau_r = \frac{1}{k_p} \frac{L_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right)}{L_m V_s} \quad (IV.6)$$

Les variations du vent sont rapides et les constantes de temps mécanique pour notre système éolien sont importantes alors on choisi un  $\tau_r$  (le temps de réponse du système) de l'ordre de 10 ms suffisamment rapide pour l'utilisation et la régulation.

S'imposer une valeur plus faible n'améliorerait probablement pas les performances de l'ensemble, mais risquerait d'engendrer des perturbations lors des régimes transitoires en provoquant des dépassements et des instabilités indésirables [23] [45] [58].

On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$k_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s \left( L_r - \frac{L_m^2}{L_s} \right)}{L_m V_s} \quad \text{et} \quad k_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{V_s L_m} \quad (IV.7)$$

Nous avons utilisé ici la méthode de compensation des pôles pour sa rapidité, il est évident qu'elle n'est pas la seule méthode valable pour la synthèse du régulateur PI.

La synthèse du régulateur PI utilisé pour stabiliser le système à cause de sa rapidité et de sa simplicité.

Mais face aux hypothèses faites pour simplifier le modèle de la MADA, le PI est un régulateur qui présente plusieurs inconvénients :

- Ajout d'un zéro dans le numérateur de la fonction de transfert en boucle fermée ce qui entraîne des dépassements importants lors des transitoires.
- Introduction d'un déphasage de la fonction intégrale pouvant entraîner une forte instabilité.
- Les coefficients sont directement calculés en fonction des paramètres de la machine ce qui entraîne une robustesse médiocre face à la variation de ces paramètres.
- Les éventuelles perturbations ne sont pas prises en compte et il y a peu de degrés de liberté pour le réglage.

## 6. RESULTATS DE SIMULATION

La simulation du système a été réalisée sous MATLAB/SIMULINK afin d'évaluer ses performances. Nous allons simuler le modèle de la GADA pilotée par la commande vectoriel directe et indirect et alimentée par un onduleur du coté rotor en supposant que la vitesse du vent a un gisement de la région de Adrar chapitre III (Fig.3) afin d'analyser le découplage réalisé pour le contrôle des deux puissances active et réactive. Les Paramètres de la GADA et de la turbine sont :Puissance nominale  $P_n = 1.5\text{MW}$ , Courant nominal  $I_n = 1900\text{A}$ , Tension nominale statorique  $V_s = 398/690\text{V}$ , Fréquence nominale statorique  $f = 50\text{Hz}$ , Tension nominale rotorique  $V_r = 225/389\text{V}$ , Résistance statorique  $R_s = 0.012\Omega$ , Résistance rotorique  $R_r = 0.021\Omega$ , Inductance statorique  $L_s = 0.0137\text{ H}$ , Inductance rotorique  $L_r = 0.0136\text{H}$ , Inductance mutuelle  $L_m = 0.0135\text{H}$ , Tension du bus continu  $U_{DC} = 1200\text{V}$ , Inertie totale  $J = 1000\text{kg.m}^2$ , Nombre de paires de pôles  $p=2$

### 6.1. REPONSE DES PUISSANCES

Dans cette partie de chapitre on va imposer des échelons de puissance active et réactive alors que la machine est entraînée par la turbine soumise à un vent de

vitesse variable acquis dans le chapitre précédent. Ce test consiste à visualiser des réponses aux échelons imposés (temps de réponse, erreur statique, dépassement).

Cet essai nous permet aussi de vérifier le découplage des puissances générées par la MADA lorsque les consignes des puissances varient instantanément. Les figures 7 et 9 représentent la réponse de la puissance active et réactive par la méthode directe. Les figures 8 et 10 représentent la vue rapprochée de la réponse d'un certain point de la puissance active et par la méthode directe. Les figures 11 et 13 représentent la réponse de la puissance active et réactive par la méthode indirecte, Les figures 12 et 14 représentent la vue rapprochée de la réponse de la puissance active et par la méthode indirecte.

### 6.1.1. Commande direct

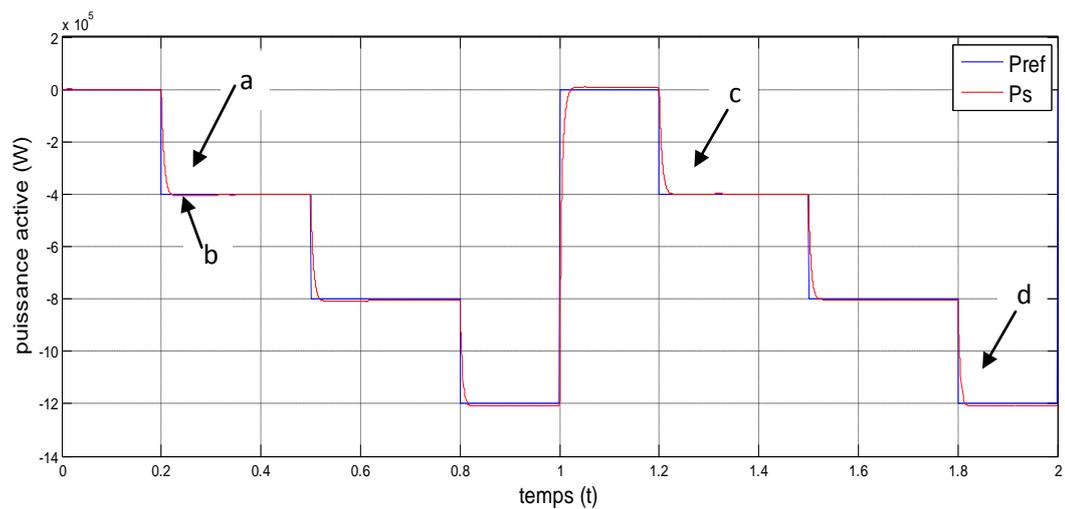
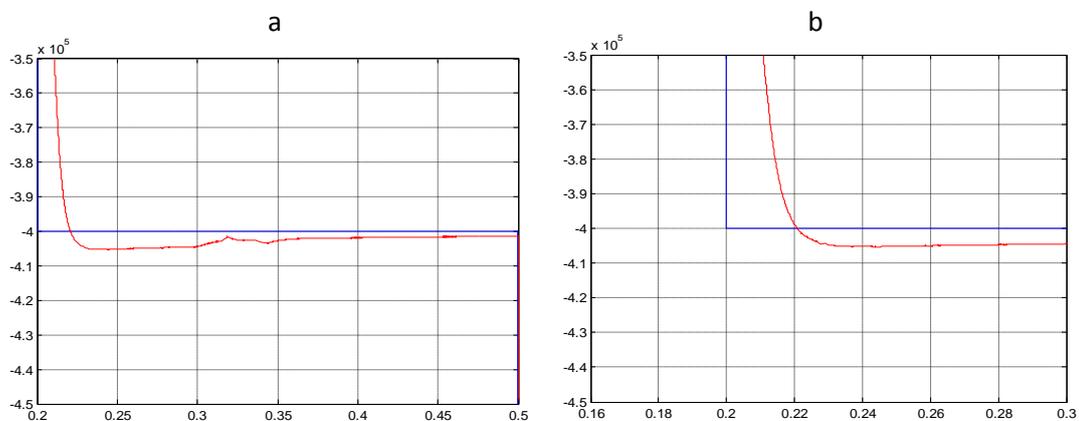


Fig.7 Réponse de la puissance active par la méthode directe



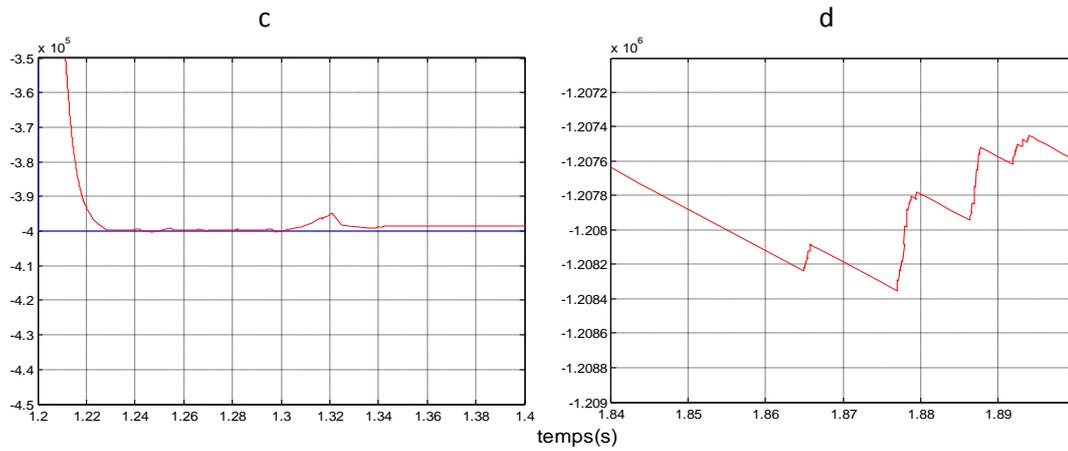


Fig.8 Vue rapprochée de la réponse de la puissance active par la méthode directe.

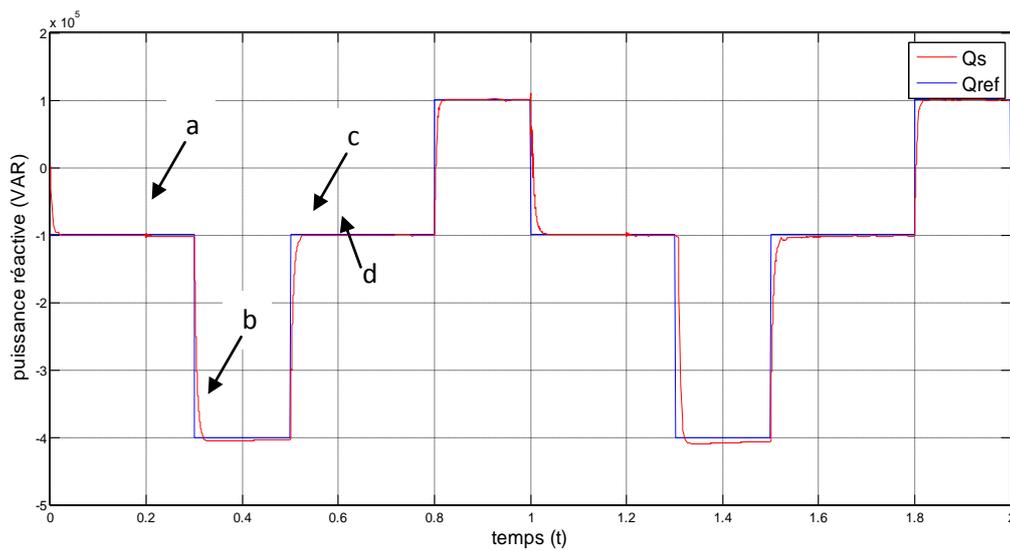
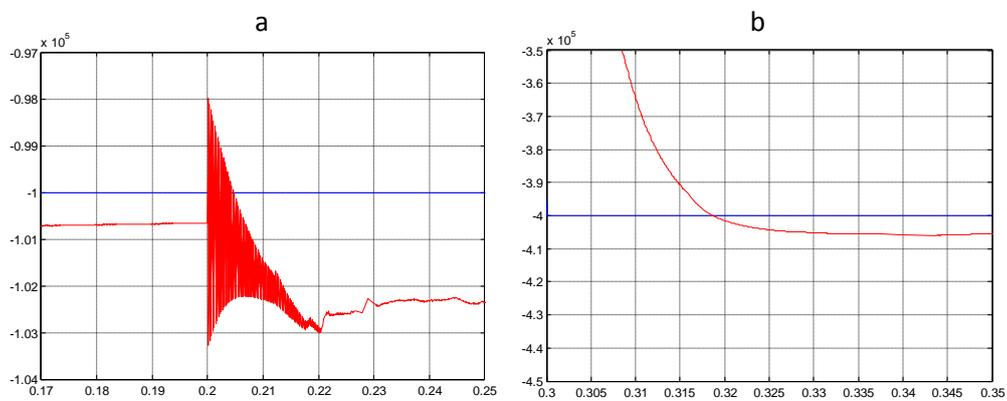


Fig.9 Réponse de la puissance réactive par la méthode directe.



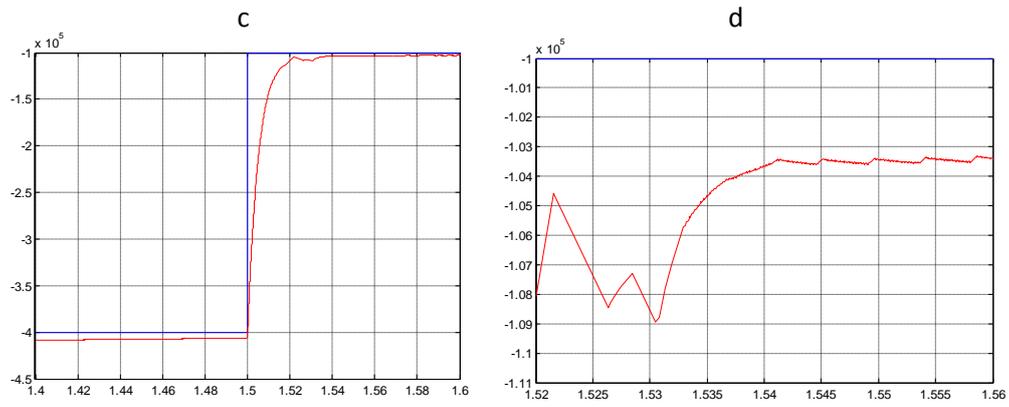


Fig.10 Vue rapprochée de la réponse de la puissance réactive par la méthode directe.

6.1.2. Commande indirect

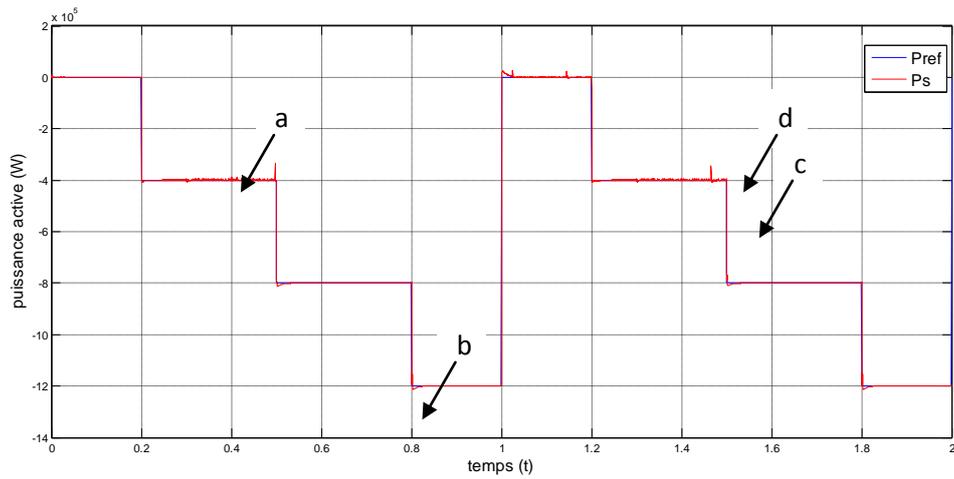
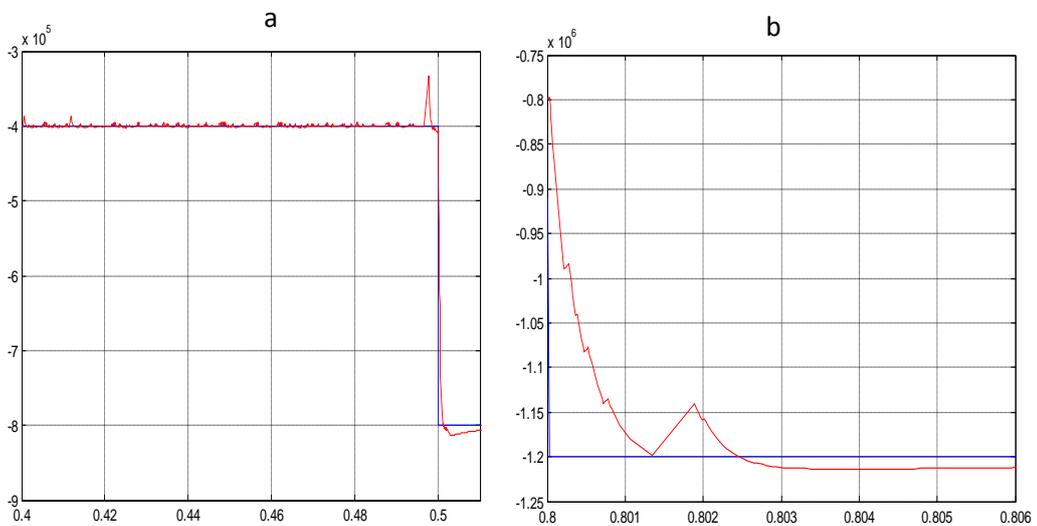


Fig.11 Réponse de la puissance active par la méthode indirecte.



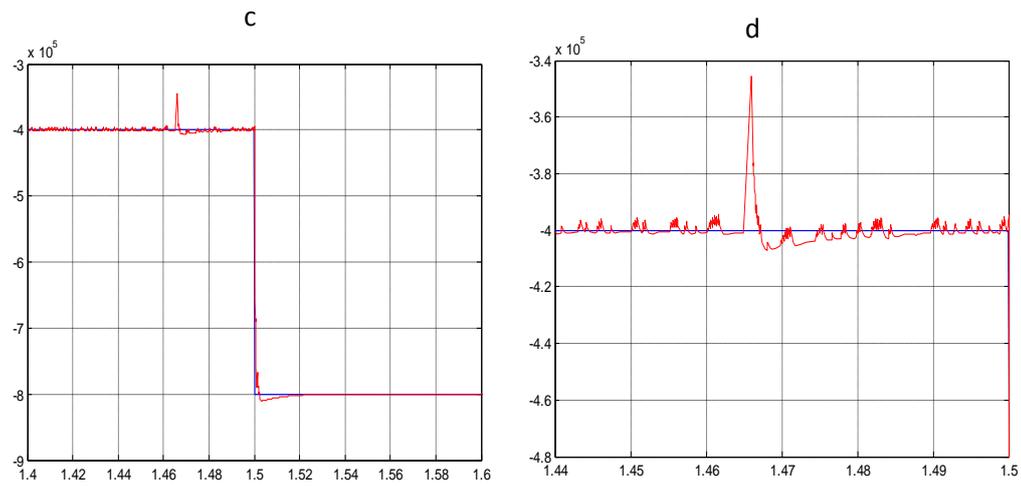


Fig.12 Vue rapprochée de la réponse de la puissance active par la méthode indirecte.

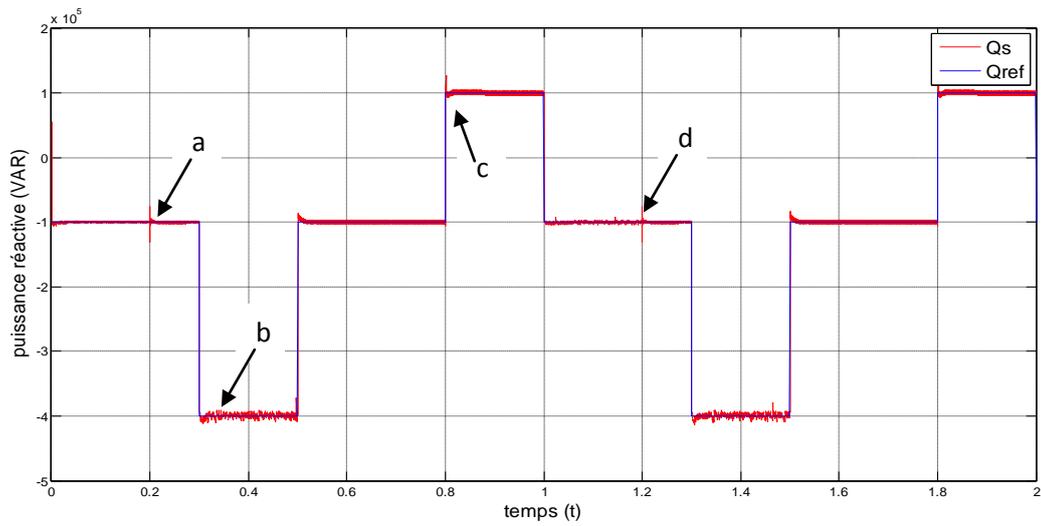
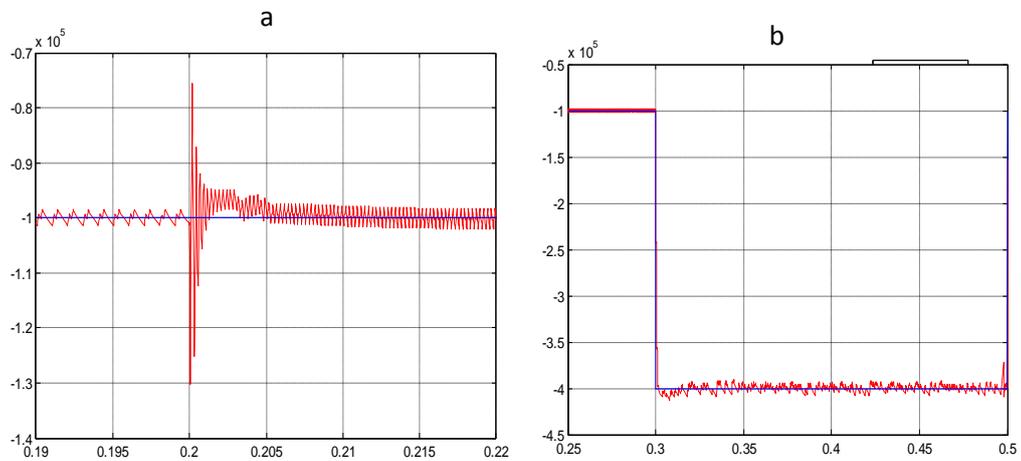


Fig.13 Réponse de la puissance réactive par la méthode directe.



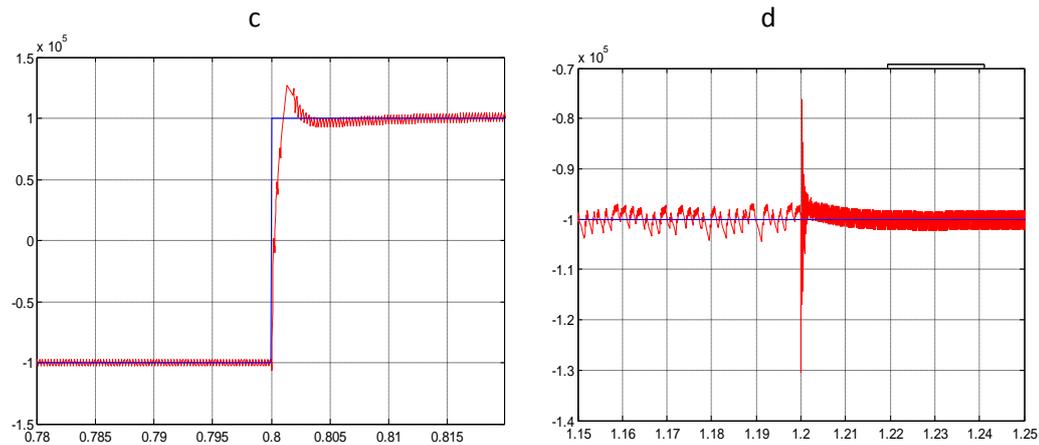


Fig.14 Vue rapprochée de la réponse de la puissance réactive par la méthode indirecte.

Les résultats de simulation montrent une bonne réaction de la génératrice asynchrone double alimentation pour les deux méthodes de commande parce qu'on peut remarquer que les références de puissance sont bien suivies par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive.

Le fonctionnement du contrôle de la puissance réactive nous a permis d'avoir une puissance réactive négative (comportement capacitif) ou positive (comportement inductif). Par contre la puissance active est gardée négative, cela signifie que la MADA fonctionne en mode génératrice.

Pour la commande directe on peut remarquer une présence d'un petit dépassement dans la réponse de la puissance active (Fig.8,a) (Fig.8,b) et la réponse de la puissance réactive (Fig.10,a) (Fig.10,b) mais ces dépassements sont très faibles qu'on peut les négliger.

Pour la commande indirecte ces dépassements sont toujours présents comme on peut le voir pour la réponse de la puissance active (Fig.12.b et 12.c) et pour la puissance réactive (Fig.14.b).

La figure 14 montre des perturbations importantes dans la réponse de la commande indirecte par rapport la commande directe.

Le couplage entre la puissance active et réactive est remarqué pour les deux stratégies de commande car un échelon imposé à l'une des deux puissances (active ou réactive) induit de faibles oscillations sur la seconde. Par contre, l'effet de cette variation est négligeable pour celle de la méthode directe parce qu'on a négligé les termes de couplage dans le model de la GADA.

Par exemple à l'instant  $t=0.2s$  pour la commande directe le changement de la puissance active impose une oscillation au niveau de la réponse de la puissance réactive (Fig.10.a) alors que à l'instant  $t=1.32s$  le changement de la puissance

réactive impose une oscillation au niveau de la réponse de la puissance active (Fig 14.c).

À l'instant  $t=0.2s$  et  $t=1.2s$  pour la commande indirecte, le changement de la puissance active impose une oscillation au niveau de la réponse de la puissance réactive (Fig 10.a et 10.d), alors à l'instant  $t=0.5s$  et  $t=1.47s$  le changement de la puissance réactive impose une oscillation au niveau de la réponse de la puissance active (Fig 14.a) (Fig 14. d).

## 6.2. REPONSE DES COURANTS STATORIQUE ET ROTORIQUE

Les résultats obtenus des réponses des courants statorique et rotorique représentés dans les figures 15 et 16 montrent que la GADA produit un courant statorique et rotorique triphasé presque sinusoïdale (ce qui signifie une bonne qualité d'énergie fournie au récepteur), et proportionnel à la puissance active fournie que ce soit pour la commande direct ou indirect.

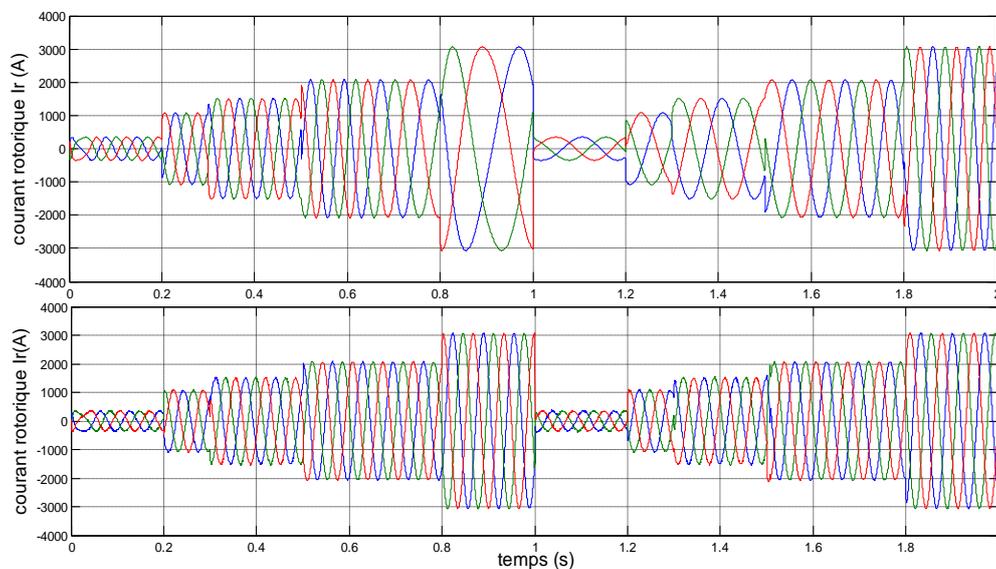


Fig.15 Réponse des courant statorique et rotorique triphasé par la méthode directe.

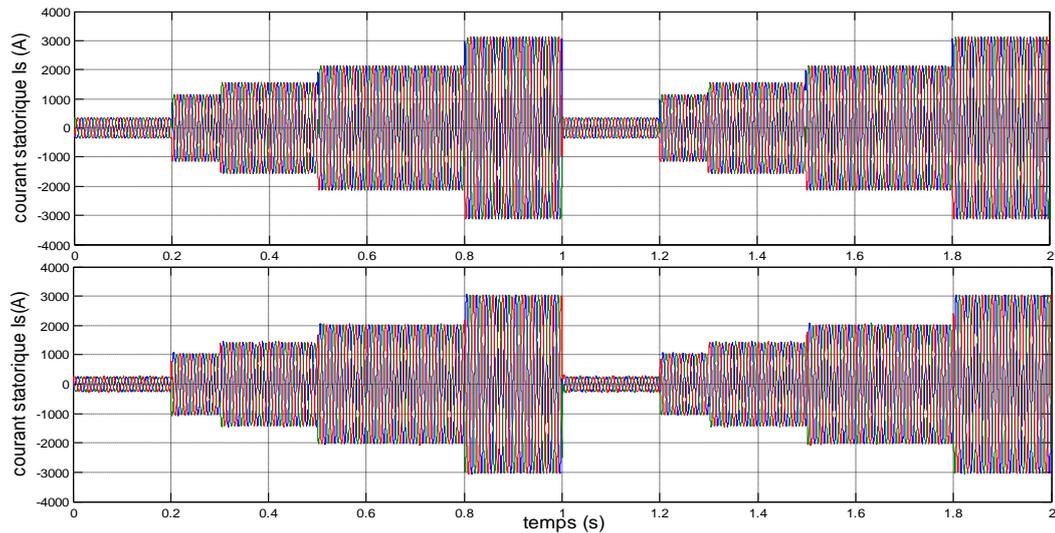


Fig.16 Réponse des courant statorique et rotorique triphasé par la méthode indirecte.

Nous remarquons, pour les deux méthodes dans les figures 17 et 18, que la composante directe du courant statorique a la même allure que la composante directe du courant rotorique. De même pour la composante quadratique du courant statorique a la même allure que la composante quadratique du courant rotorique.

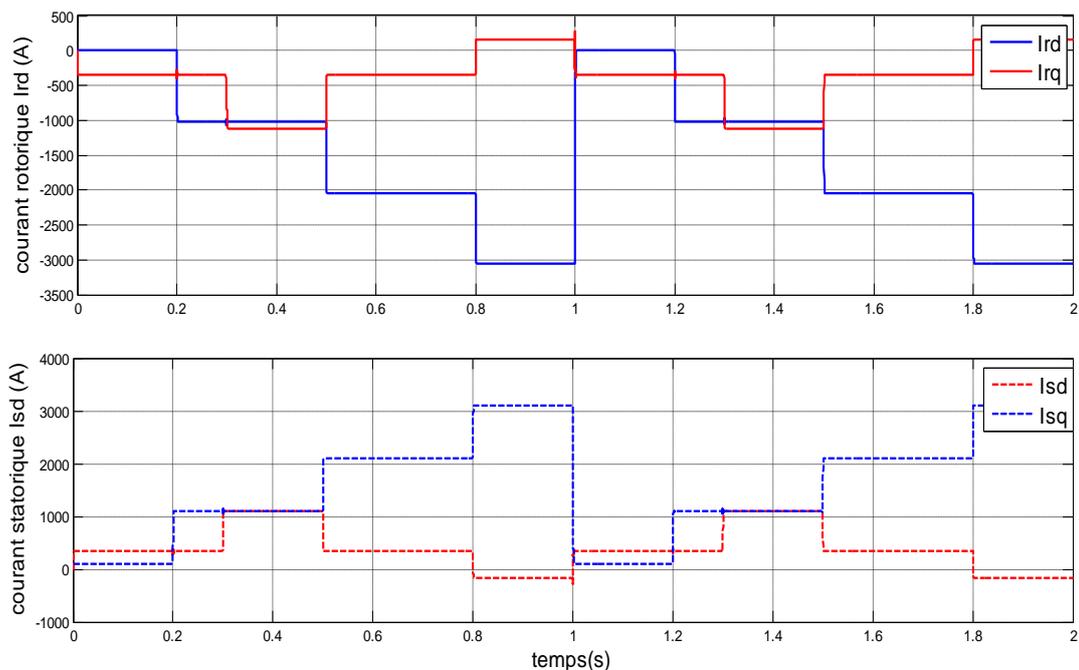


Fig.17 Réponse des courant statorique et rotorique biphasé (d,q) par la méthode directe.

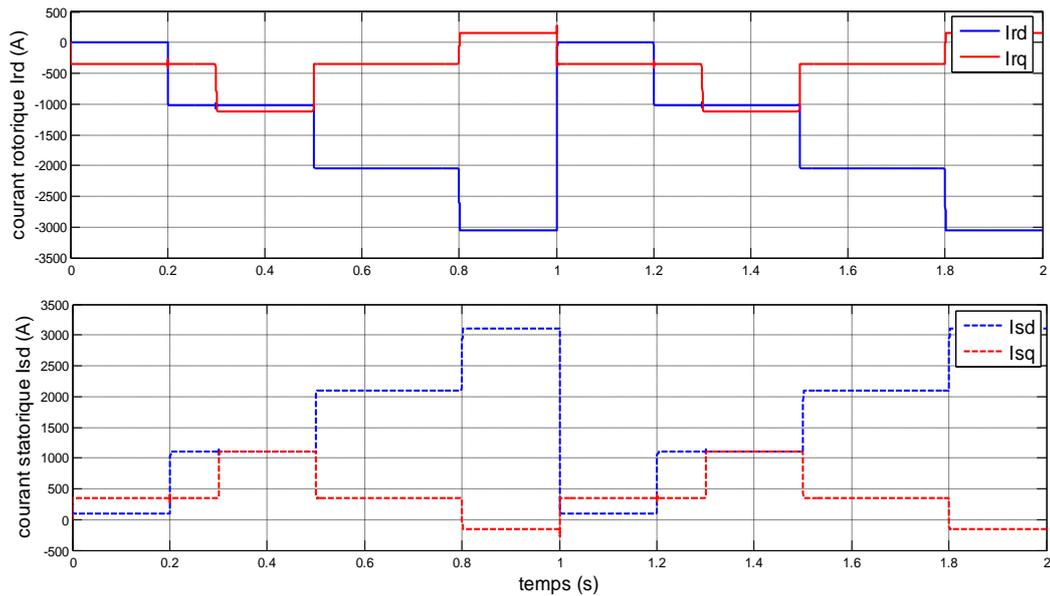


Fig.18 Réponse des courant statorique et rotorique biphasé (d,q) par la méthode indirecte.

On remarque que les composantes en quadratique du courant ont la même forme que la puissance active et les composantes directes du courant ont la même forme que la puissance réactive, alors on peut dire que la puissance active est contrôlée par les composantes en quadratique du courant et la puissance réactive est contrôlée par les composantes directes du courant.

D'un autre côté, on remarque d'après la figure 12 qui illustre les spectres d'harmoniques pour la commande directe d'une phase du courant statorique et rotorique de la GADA pour 3 cycles de fonctionnement commençant par 0.3s de 5 cycle, de la PC de contrôleurs, obtenu en utilisant la transformée de fourrier rapide (FFT) que le taux d'harmonique (THD) est réduit (THD =44.23%) pour les courant rotorique et (THD = 11.29%) pour les courant statorique. Ces résultats nous permettent de conclure que les courant on un très haut taux de distorsion.

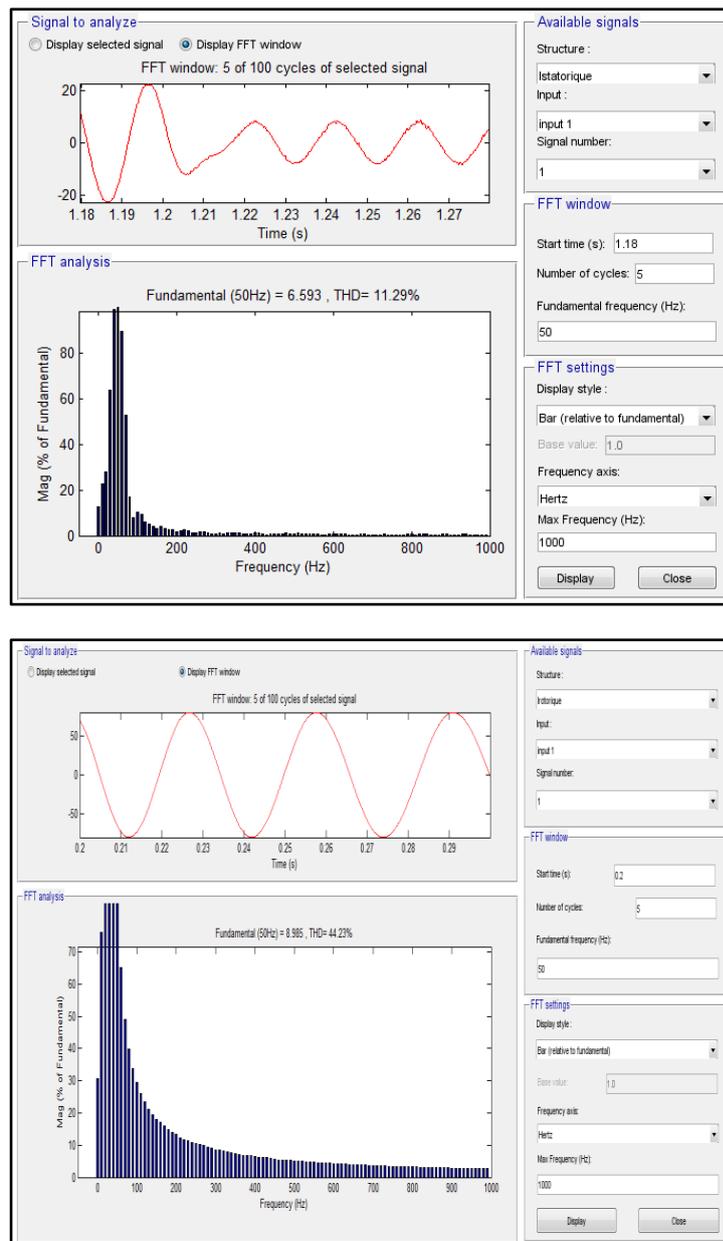


Fig.19 Spectre d'harmonique d'une phase du courant statorique et rotorique commande directe

D'un autre côté, on remarque d'après la figure 12 qui illustre les spectres d'harmoniques pour la commande indirecte d'une phase du courant statorique et rotorique de la GADA pour 3 cycles de fonctionnement commençant par 0.3s de 5 cycle, de la PC de contrôleurs, obtenu en utilisant la transformée de fourrier rapide (FFT) que le taux d'harmonique (THD) est réduit (THD =56.38%) pour les courant rotorique et (THD = 14.20%) pour les courant statorique. Ces résultats nous permettent de conclure que les courant on un très haut taux de distorsion.

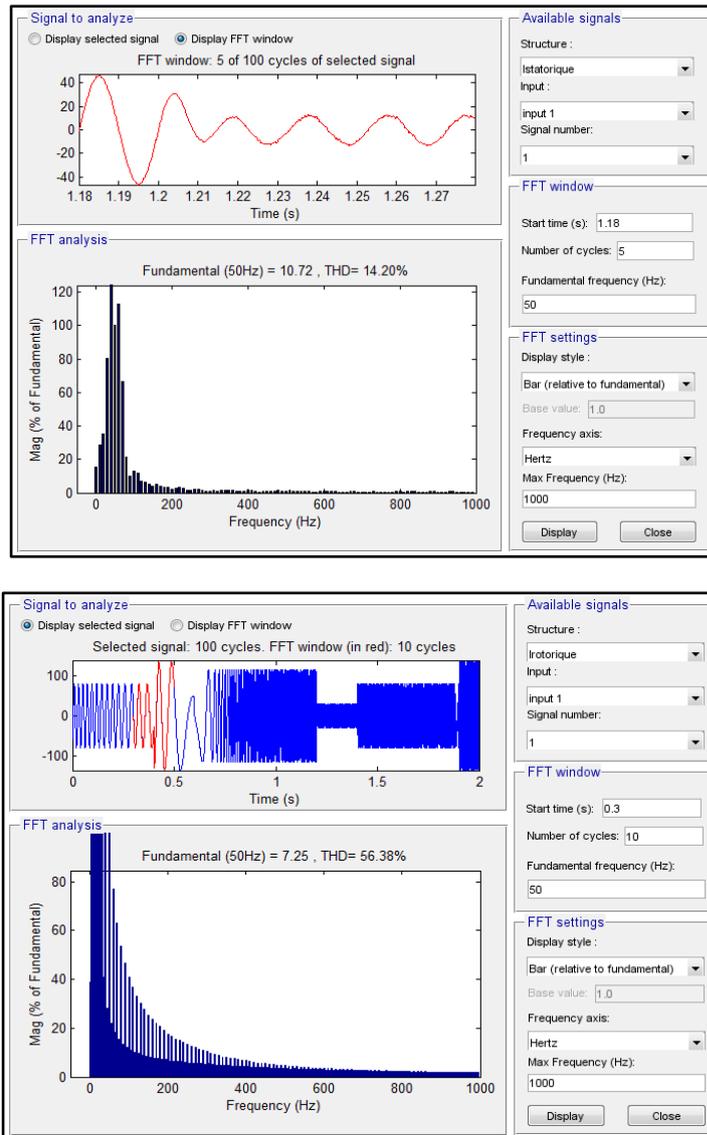


Fig.20 Spectre d'harmonique d'une phase du courant statorique et rotorique commande indirecte

### 6.3. TEST DE ROBUSTESSE

Ce test consiste à faire varier les paramètres de la MADA pour tester la robustesse des deux commandes et pour s'approcher à l'environnement et au mode d'exploitation de la machine. Certainement que les gains du correcteur PI sont calculés à base des fonctions de transfert dont les paramètres de la machine sont supposés fixes alors que l'identification paramétrique de la machine ne donne pas lieu à des valeurs exactes et définitives dues à la méthode employée et aux appareils de mesure.

En plus le changement naturel des paramètres de la MADA dû à certains phénomènes intérieurs (échauffement, variation de la charge, saturation de circuits magnétiques, forme de l'entrefer, effet pelliculaire, régime défluxé, ... etc.) ou

extérieurs (perturbation, vibration, température de l'enivrement, magnétisme des autre machines, facteur de temps,....etc.)

Pour réaliser ce test de robustesse de la MADA pour deux modes de commande (commande direct et indirect) avec le changement des paramètres effectué est :

- Résistances  $R_s$  et  $R_r$  multipliées par 2.
- Inductances  $L_s$ ,  $L_r$  et  $M$ , divisées par 2.

Figure 19 représente la commande vectorielle directe vis-à-vis des variations paramétriques de la MADA et la figure 20 représente la commande vectorielle indirecte vis-à-vis des variations paramétriques de la MADA.

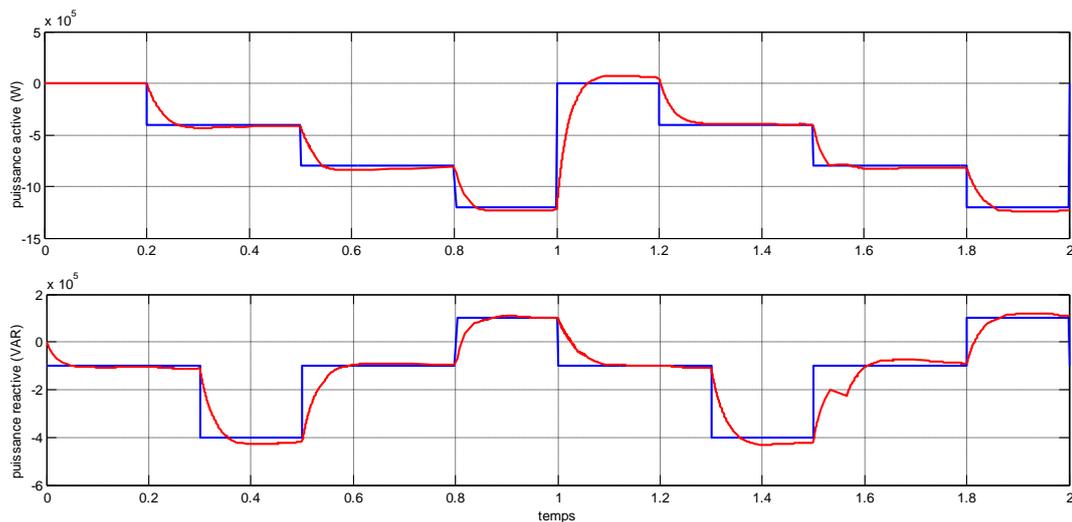


Fig.21 La commande vectorielle directe vis-à-vis aux variations paramétriques de la MADA.

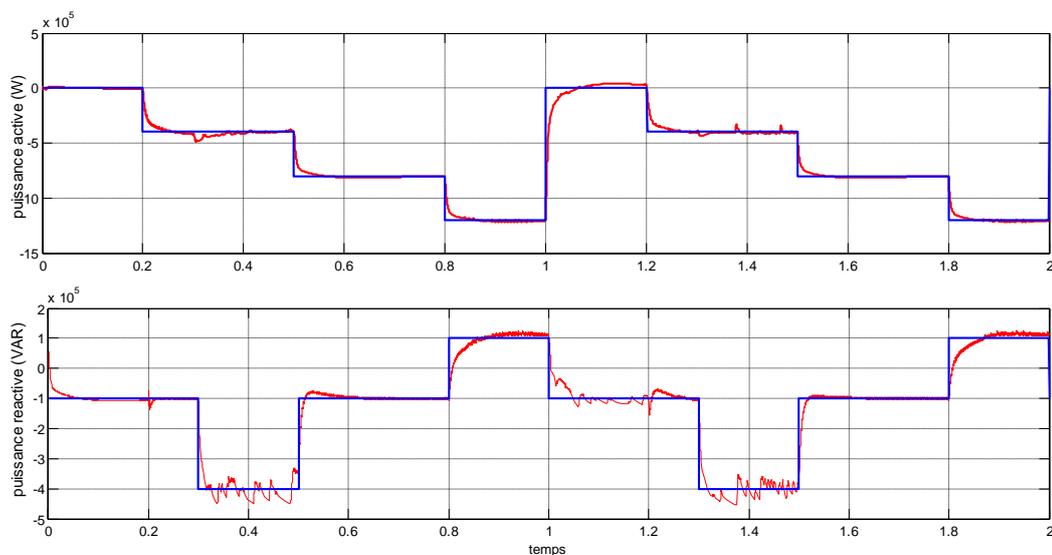


Fig.22 La commande vectorielle indirecte vis-à-vis des variations paramétriques de la MADA.

Le test de robustesse montre la sensibilité de ces commandes vectorielles face au changement paramétrique qu'on a pu remarquer dans les résultats représentés dans les figures précédentes parce que la variation des paramètres affectent les réponses des puissances actives et réactives des deux méthodes utilisées dans les deux régimes de fonctionnement de la GADA : transitoires et permanents.

Dans les régimes transitoires, on peut remarquer l'augmentation des temps de réponses et l'amplification du dépassement de la réponse des puissances pour la commande directe, alors que dans les régimes permanents, des perturbations ont été remarquées sur les résultats obtenus, mais l'effet de couplage est plus important pour les réponses de la méthode indirecte par rapport à celles directes (surtout la réponse de l'énergie réactive). Parce qu'on n'a pas pris en considération pour la commande indirecte les termes de couplage.

## 7. CONCLUSION

Après la simplification du modèle de la machine asynchrone à double alimentation et le découplage des deux puissances active et réactive par la méthode du flux orienté, nous avons développé deux méthodes de commande directe et indirecte en utilisant dans ces deux méthodes la régulation par le correcteur classique PI. L'étude des performances de ces deux méthodes par simulation MATLAB a montré des résultats satisfaisants pour la poursuite des échelons et pour les réponses des courants statoriques, mais le test de robustesse a montré que le régulateur PI est faible contre les variations paramétriques de la machine.

Le prochain chapitre est consacré à étudier la commande prédictive qui occupe une large place dans la littérature de la commande des systèmes non linéaire et a prouvé de grande performance et très forte robustesse.

## CHAPITRE V

# COMMANDE PREDICTIVE DE LA GADA

### 1. INTRODUCTION

Le développement des microcontrôleurs dans le monde a permis aux chercheurs d'exploiter des théories techniques développées dans les années 40 et 50 par les mathématiciens avec des coûts raisonnables et de pouvoir les optimiser et de les améliorer. Dans le monde des machines électriques, l'utilisation des commandes par intelligence artificielle nous a permis de bien contrôler les actionneurs électriques et mieux les exploiter. La majorité de ces commandes sont inspirées de l'expert (l'être humain) ; des techniques avancées et très développées maîtrisées par les ordinateurs.

Parmi ces commandes on peut aussi noter la commande non linéaire, la commande multi variable, la commande robuste et la commande prédictive [59].

Nous avons vu dans le chapitre précédent les réponses de notre machine contrôlée par le correcteur PI alors dans ce chapitre on va utiliser la commande prédictive l'une de ces techniques d'intelligence artificielle pour mieux contrôler notre machine.

La commande prédictive (ou compensation ou correction anticipatrice) est une technique de commande avancée de l'automatique.

La commande prédictive peut être utilisée pour commander des systèmes complexes comportant plusieurs entrées et sorties où le simple régulateur PI est insuffisant. Cette technique est particulièrement intéressante lorsque les systèmes possèdent des retards importants, des réponses inverses et de nombreuses perturbations. Les principaux utilisateurs de la commande prédictive sont les raffineries de pétroles, l'industrie chimique et agro-alimentaire, la métallurgie, l'aérospatiale [60].

Comme son nom l'indique cette commande se base sur la prédiction, une notion bien connue dans plusieurs activités faite par l'humain chaque jour tel que la marche, la conduite d'une automobile ou pratique sportive où il cherche à anticiper une trajectoire afin de prévoir les gestes et manœuvres à effectuer.

Le principe de cette technique est d'utiliser un modèle dynamique du processus à l'intérieur du contrôleur en temps réel afin d'anticiper le futur comportement du procédé. Alors on peut classer la commande prédictive parmi les techniques de contrôle à modèle interne (IMC: Internal Model Controller).

Il existe plusieurs types de commande prédictive suivant les différents algorithmes de conception des contrôleurs prédictifs. Nous pouvons citer la commande prédictive étendue autorégressive (EPSAC), la commande adaptative à horizon étendu (EHAC), commande prédictive fonctionnelle (P.F.C.) et enfin la commande prédictive généralisée (GPC).

## 2. HISTORIQUE DE LA COMMANDE PREDICTIVE

La fin de la décennie 70 été marquée par un intérêt pour le MPC et surtout dans ses développements industriels. En Europe, on peut citer les travaux de Richalet et al. (1976), (1978), où il a formulé le problème de la commande heuristique prédictive basée sur le modèle (MPHC : Model Prédictive Heuristic Control) qui fût connue plus tard sous le nom de commande algorithmique (MAC : Model Algorithmic Control). Aux Etats-Unis, Cutler et Ramaker (1980) ont développé ce qui sera connu, plus tard, comme Matricielle Dynamique (DMC : Dynamic Matrix Control). Dans ces approches, l'objectif est de poursuivre une référence mais les contraintes ne sont pas prises en compte, un modèle dynamique du processus est utilisé dans les deux contributions (la réponse impulsionnelle dans la première et la réponse indicielle dans la seconde) en vu de quantifier l'effet des actions de commande sur la sortie. Les commandes sont calculées pour minimiser l'erreur prédite sous restrictions d'exécution (fonction objectif). L'optimisation est répétée à chaque période d'échantillonnage, s'appuyant aussi sur les données mesurées sur le processus. Ces algorithmes ont permis de définir l'essence même des stratégies prédictives et les applications nombreuses dans le milieu industriel ont assurée leur pérennité [61], [59].

En même temps et indépendamment, certains groupes européens de recherche académique ont commencé à développer des travaux basés sur les idées du prédictif pour des modèles formulés à partir d'une représentation entrée-sortie du système (fonction transfert).

La commande auto adaptative prédictive étendue développée par de De Keyser et Van Cauwenberghe (1979) (le EPSAC : Extended Prediction Self Adaptive Control) propose un signal de commande constant pour tout l'horizon de prédiction et qui est appliqué dès le début du calcul de la commande qui optimise le critère de coût choisi. Dans la commande adaptative à horizon étendu de Ydstie (1984), (le EHAC : Extended Horizon Adaptive Control ), l'idée fondamentale consiste à calculer à chaque instant la séquence des signaux de commande pour essayer de maintenir la sortie future la plus proche possible de la consigne pour un horizon de temps plus grand que le retard présent sur le processus. La commande prédictive généralisée

par Clarke, Mohtadi et Tuffs (1987) [5], (le GPC : Generalized Predictive Control) est en ce moment, la méthode la plus populaire. Cette méthode permet la prise en compte des contraintes sur les entrées et les sorties en posant un problème d'optimisation quadratique.

Après ces travaux pilotes, l'intérêt pour le MPC a augmenté graduellement depuis les années 80 et d'autres méthodologies partageant les mêmes idées sont apparues dans la littérature spécialisée de la commande. Entre autres, peuvent être mentionnées, (MUSMAR : Multi Step Multivariable Adaptive Control), Greco et al (1984) (MURHAC : Multipredictor Receding Horizon Adaptive Control), Lemos et Mosca (1985) (PFC : Predictive Functional Control), (UPC : Unified Predictive Control), Söeterboek (1992) [65], [66], [67].

Malgré le développement étendu qu'a connu le MPC pendant la fin de la décennie 70 et celle de 80, ce n'est qu'au début des années 90 qu'on commence à se préoccuper de l'étude de la stabilité et de la robustesse en MPC.

Le MPC peut aussi être formulé dans le contexte de la représentation en variables d'état Morari (1994). Ceci permet non seulement de faire usage de théorèmes et résultats existant dans la théorie d'espace d'état, mais aussi facilite l'extension de la théorie MPC à des cas plus complexes comme ceux des systèmes avec perturbations stochastiques, bruits sur les variables de mesure ou commande multivariable.

Étant donné la charge élevée de calcul qu'exigent les algorithmes de programmation quadratique dans la stratégie MPC, beaucoup d'auteurs commencent à étudier la possibilité d'obtenir une solution rapide fournissant un résultat le plus souvent sous optimal dans le problème d'optimisation. Dans cette catégorie on peut mentionner les travaux de Bemporad et al. (2002), Ramirez et Camacho (2001) [59].

### **3. MODE DE FONCTIONNEMENT DE LA COMMANDE PREDICTIVE**

La commande prédictive généralisée a été proposée par Clark en 1985 ; elle a été implantée avec succès dans l'industrie tout en montrant de bonnes performances, puisqu'elle est robuste et efficace pour un éventail assez large des modèles des procédés.

Le principe de la commande prédictive généralisé GPC est de prévoir la valeur que devrait prendre le signal de sortie du système de déduire la commande conduisant à ces valeurs ou utiliser un modèle dynamique du système à l'intérieur du contrôleur en temps réel afin d'anticiper le futur comportement du système.

Elle se base sur une loi de commande  $u(k)$  calculée grâce à l'anticipation de la trajectoire de la consigne  $w(k)$ . Ce mode de fonctionnement est fréquemment reproduit par l'homme ou court de ces activités quotidiennes dans la marche et la conduite d'une voiture...etc, ou l'homme cherche à anticiper une trajectoire (consigne  $w(k)$ ) pour pouvoir prévoir les gestes et manœuvres à effectuer (loi de commande  $u(k)$ ). La figure 1 explique cette philosophie de commande.

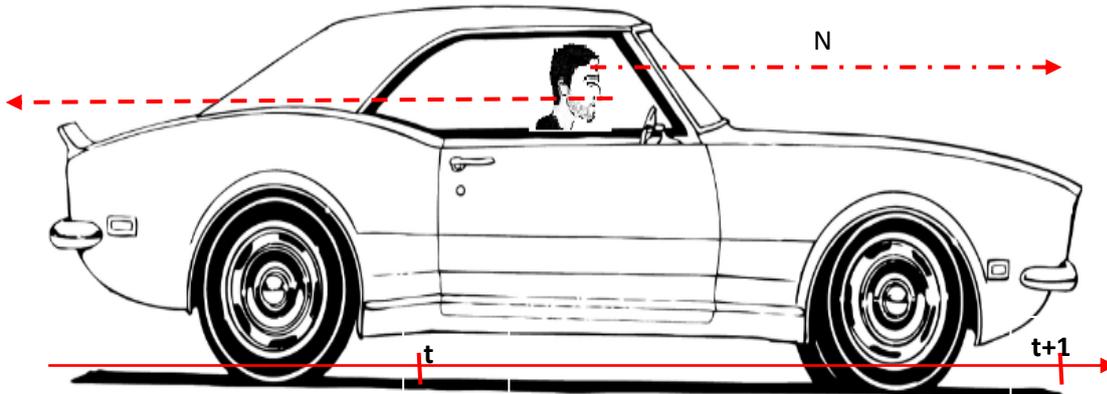


Fig.1 -Philosophie de la commande prédictive.

La commande prédictive généralisée se base sur quatre grandes idées [67] [68] :

- ♦ Création d'un effet anticipatif par exploitation de la trajectoire à suivre dans le futur pour cela il nous faut au moins la connaissance d'un horizon de quelques points
- ♦ Au de là de l'instant présent, cette contrainte permettant de tirer partie de toutes les ressources de la méthode restreint nécessairement le domaine d'application à la commande de systèmes pour lesquels la trajectoire à suivre est parfaitement connue et stockée point par point dans le calculateur).
- ♦ Définition d'un modèle numérique de prédiction.
- ♦ Minimisation d'un critère quadratique à horizon fini.
- ♦ Application du principe de l'horizon fuyant.

La mise en œuvre de cette commande GPC nécessite la considération des points suivants [68] [69] :

- ♦ Définition d'un modèle numérique du système permettant de réaliser la prédiction comportement futur du système. Ce modèle peut être obtenu par une discrétisation de la fonction de transfert continue du modèle (transformée en  $z$ ) ou par une identification préalable hors ligne du système. Cette particularité à base de modèle, dite 'MBC' (Model Based Control).

- ♦ Elaboration d'une séquence de commandes futures. Elle est obtenue par minimisation d'une fonction de coût quadratique, sur un horizon fini, portant sur les erreurs de prédiction futures, écarts entre la sortie prédite du système et la consigne ou une trajectoire de référence future et sur un terme dépendant de la commande.
- ♦ Seul le premier élément  $u(k)$  de la séquence optimale de la commande est appliqué sur le système, tous les autres éléments de la séquence sont oubliés. A la période d'échantillonnage suivante, une nouvelle sortie est mesurée et la procédure complète est répétée. Ce procédé s'appuie sur le principe de l'horizon fuyant (receding horizon)

La figure 2 représente le principe de la commande prédictive où on applique une loi de commande  $u(k)$  pour suivre une trajectoire représentée par la consigne  $\omega(k)$ .

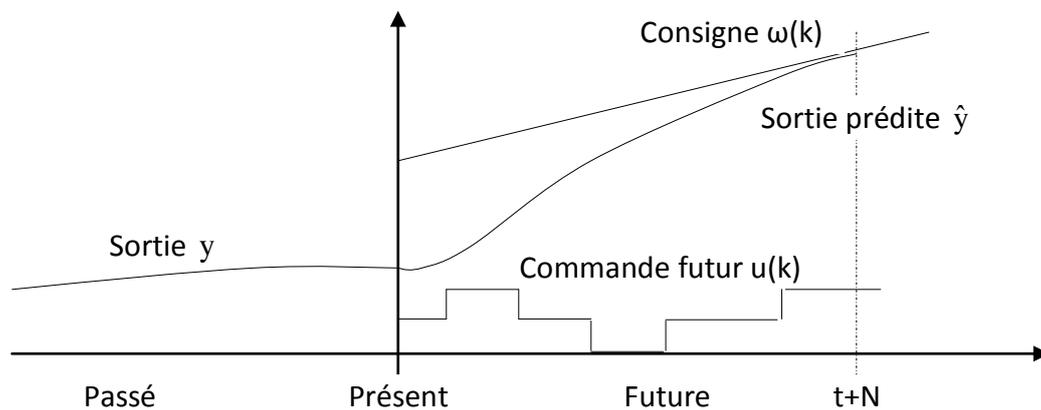


Fig.2 Le principe de la commande prédictive

#### 4. ALGORITHME DE LA COMMANDE GPC

La section précédente nous a permis d'établir le schéma de principe représenté dans la figure 3 [70][71][72], l'algorithme de la commande prédictive se base sur le choix du modèle puis de calculer une fonction de coût et essayer de minimiser cette fonction pour optimiser la loi de commande de chaque puissance.

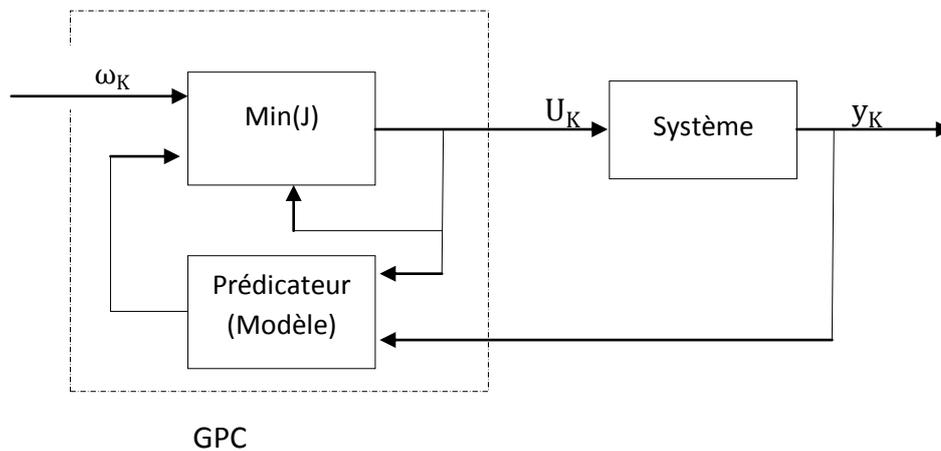


Fig.3 Le schéma de principe du GPC

**4.1. MODELE DE PREDICTION**

Une grande classe de système réel est considérée comme linéaire ou à la limite peut être linéarisée au voisinage d'un point de fonctionnement et la propriété de linéarité permet de ramener l'étude d'un système multi variable à celle de plusieurs systèmes mono variables (principe de superposition). Nous savons que le modèle statique doit décrire le régime permanent d'un système dans toute sa gamme de fonctionnement et est par conséquent presque toujours non linéaire, le mieux est donc d'utiliser un modèle dynamique décrivant le comportement du système autour d'un point de fonctionnement particulier qui ainsi pourra être facilement linéarisé [75].

Pour pouvoir commander notre système, il faut avoir un modèle de base linéaire, discrète et dynamique. Ce modèle numérique de prédiction est classiquement défini par fonction de transfert entrée/sortie. Le modèle est représenté sous forme ARIMAX (Auto-Régressive à Moyenne Ajustée avec entrée eXogène avec integrateur) ou CARIMA (Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average) en fixant pour le polynôme de bruit  $C(q^{-1}) = 1$  [74] [75]:

$$\begin{cases} A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})u(k-d) + \frac{P(q^{-1})C(q^{-1})}{\Delta(q^{-1})} \\ (q^{-1})y(k) = B(q^{-1})u(k-d) + \frac{P(q^{-1})C(q^{-1})}{\Delta(q^{-1})} \end{cases} \quad (V.1)$$

$\Delta(q^{-1}) = 1 - q^{-1}$ ,  $u(k)$  et  $y(k)$  sont respectivement l'entrée et la sortie du modèle,  $\xi(k)$  est un bruit blanc centré,  $q^{-1}$  est l'opérateur retard,  $d$  est le délai introduit par le système et  $A(q^{-1})$  et  $B(q^{-1})$  des polynômes définis par :

$$\begin{cases} A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_{n_a}q^{-n_a} \\ B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + \dots + b_{n_b}q^{-n_b} \end{cases} \quad (V.2)$$

L'introduction de  $\Delta(q^{-1}) = 1 - q^{-1}$  dans le modèle de bruit assure une action intégrale dans le correcteur et permet, donc, d'annuler toute erreur statique vis-à-vis d'une entrée ou d'une perturbation en échelon [73]. L'utilisation de ce modèle de perturbation est en fait une conséquence de la présence de perturbations de charge en échelon dans de nombreux processus industriels, celui-ci garantissant donc un comportement avec une erreur statique nulle face aux perturbations considérées. Ceci est une conséquence directe du principe du modèle interne [74]. Ce principe dit que pour contrôler un système avec des perturbations instables, la dynamique de la perturbation doit apparaître dans la dynamique du régulateur. Ce modèle CARIMA est représenté par la figure 4.

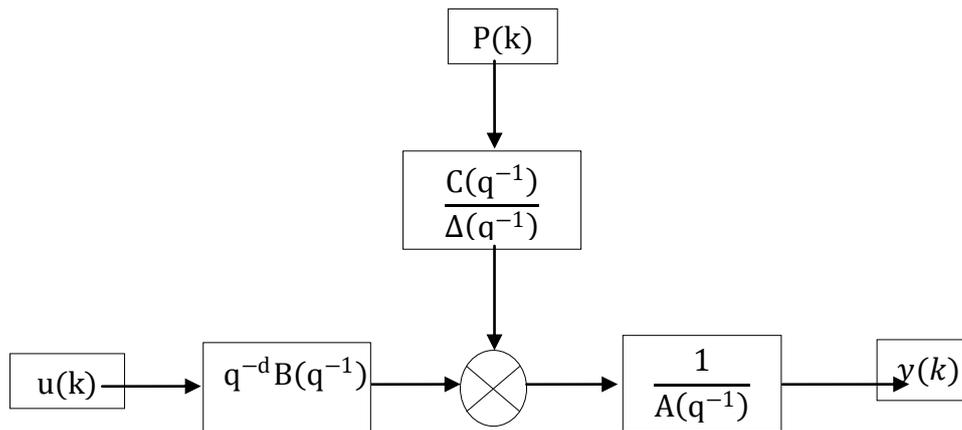


Fig.4 Modèle CARIMA

Ce modèle a été utilisé par 'Tuff' et 'Clark' en 1985 pour le développement des stratégies du contrôle prédictif à un pas en avant. L'utilisation de ce modèle (avec l'introduction d'un intégrateur dans le système de contrôle) permet d'avoir deux avantages essentiels :

- L'amélioration de la qualité d'identification des paramètres de modèle de processus à contrôler.

- L'effet d'éliminer l'influence des oscillations (offset libre) de perturbation non désirées.

$u(k)$  et  $y(k)$  sont respectivement l'entrée et la sortie du modèle alors dans notre cas nous allons développer deux modèles CARIMA : le premier pour contrôler la puissance active  $P_s$  avec l'entrée  $V_{qr}$  et le deuxième model pour contrôler la puissance active  $Q_s$  avec l'entrée  $V_{qr}$ .

On remplace aussi  $C(q^{-1})=1$  and  $P(q^{-1})=\xi(k)$

$$A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1}) V(k-d) + \frac{\xi(k)}{\Delta(q^{-1})} \quad (V.3)$$

On conclue la relation pour la puissance active et réactive :

$$A(q^{-1})P_s(k) = B(q^{-1}) V_{rq}(k-d) + \frac{\xi(k)}{\Delta(q^{-1})} \quad (V.4)$$

$$A(q^{-1})Q_s(k) = B(q^{-1}) V_{rd}(k-d) + \frac{\xi(k)}{\Delta(q^{-1})} \quad (V.5)$$

#### 4.2. FONCTION DE COUT

Le but général est de faire tendre l'erreur de sortie future vers zéro, avec un effort de commande minimum. La stratégie de la loi de commande GPC est de minimise une somme pondérée des carrés des erreurs futures entre la sortie prédite et la consigne et des incréments des commandes futures [67] [73] [76] :

$$J_{GPC} = \sum_{j=N_1}^{N_2} \left[ \hat{y}(k+j+d) - \omega(k+j+d) \right]^2 + \lambda \sum_{j=1}^{N_u} \Delta u^2(k+j-1) \quad (V.6)$$

On peut déduire la fonction de coût pour chaque puissance active ou réactive que l'on présente dans les deux équations suivantes :

$$J_{GPC} = \sum_{N_1}^{N_2} \left[ \hat{P}_s(k+j+d) - P_{consigne}(k+j+d) \right]^2 + \lambda \sum_{j=1}^{N_u} \Delta V_{rd}^2(k+j) \quad (V.7)$$

$$J_{GPC} = \sum_{N_1}^{N_2} \left[ \hat{Q}_s(k+j+d) - Q_{consigne}(k+j+d) \right]^2 + \lambda \sum_{j=1}^{N_u} \Delta V_{rq}^2(k+j) \quad (V.8)$$

Avec :  $\Delta u(k+j) = 0$  pour  $j \geq N_u$

Le critère nécessite la définition de quatre paramètres de réglage :

- $N_1$  : horizon de prédiction minimal ;
- $N_2$  : horizon de prédiction maximal ;
- $N_u$  : horizon de prédiction sur la commande ;
- $\lambda$  : coefficient de pondération sur la commande.

Ce critère comprend donc un terme quadratique sur l'erreur et l'incrément de la commande. Nous appliquons le principe de l'horizon fuyant sur notre système alors seulement la première valeur de signal de commande est imposée pour la minimisation analytique.  $\Delta u$  fait apparaître l'aspect incrémental du modèle et enfin le coefficient  $\lambda$  et assure la convergence lorsque le système de départ présente un risque d'instabilité et permet de donner plus ou moins de poids à la commande par rapport à la sortie [67] [73].

#### 4.3. STRUCTURE DU PREDICTEUR OPTIMAL SOUS FORME MATRICIELLE

Dans cette partie de chapitre nous développons  $y(k+j)$ , le calcul future de  $y(k)$ , la prédiction à l'instant  $k$  de  $y$  à  $j$  pas d'échantillonnage en avance. Ce calcul nécessite la résolution de deux équations Diophantiennes, en se basant sur le modèle CARIMA mentionné en équation (V.1) et en appliquant les idées de modélisation présentées par Clarke et ses co-auteurs [73], la sortie prédite  $y(k+j)$  est décomposée de façon classique en réponse libre et réponse forcée, incluant une forme polynomiale pour mener à bien la synthèse polynomiale finale, solution unique d'équations de Diophantine :

$$y(k+d+j) = F_j(q^{-1})y(k) + H_j(q^{-1})\Delta u(k-1) + G_j(q^{-1})\Delta u(k+j-1) + J_j(q^{-1})\xi(k+d+j) \quad (V.9)$$

Avec :  $F_j, G_j, H_j, J_j$  polynômes solutions uniques des équations Diophantine suivantes :

$$\begin{cases} \Delta(q^{-1})A(q^{-1})J_j(q^{-1}) + q^{-d-j}F_j(q^{-1}) = 1 \\ G_j(q^{-1}).(1) + q^{-j}H_j(q^{-1}) = B(q^{-1})J_j(q^{-1}) \end{cases} \quad (V.10)$$

On peut maintenant calculer le prédicteur optimal considérant que la meilleure prédiction du bruit dans le futur est sa moyenne (supposée nulle ici), soit :

$$\hat{y}(k+j) = F_j(q^{-1})y(k) + H_j(q^{-1})\Delta u(k-1) + G_j(q^{-1})\Delta u(k+j-1) \quad (V.11)$$

Avec :

$$\text{degré}[J_j(q^{-1})] = \text{degré}[G_j(q^{-1})] = j - d$$

$$\text{degré}[F_j(q^{-1})] = \text{degré}[A(q^{-1})]$$

$$\text{degré}[H_j(q^{-1})] = \text{degré}[B(q^{-1})] - 1$$

La représentation matricielle de ce prédicteur est indispensable pour simplifier les notations :

$$\begin{cases} \hat{Y} = [\hat{y}(k+d+N_1) \dots \hat{y}(k+d+N_2)]^T \\ f(q^{-1}) = [F_{N_1}(q^{-1}) \dots F_{N_2}(q^{-1})]^T \\ h(q^{-1}) = [H_{N_1}(q^{-1}) \dots H_{N_2}(q^{-1})]^T \\ \tilde{u} = [\Delta u(k) \dots \Delta u(k+N_u-1)]^T \end{cases} \quad (V.12)$$

$$G = \begin{bmatrix} g_{N_1}^{N_1} & g_{N_1-1}^{N_1} & \dots & \dots \\ g_{N_1+1}^{N_1+1} & g_{N_1}^{N_1+1} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{N_2}^{N_2} & g_{N_2-1}^{N_2} & \dots & g_{N_2-N_u+1}^N \end{bmatrix} \quad (V.13)$$

Le prédicteur optimal à j-pas peut s'écrire sous forme matricielle :

$$\hat{y} = G \tilde{u} + f(q^{-1})y(k) + h(q^{-1})\Delta u(k-1) \quad (V.14)$$

#### 4.3.1. Prédicteur des puissances optimal

De l'équation (V.6) on peut développer les prédictions de la puissance active et réactive  $\hat{P}_s(k+j+d)$ ,  $\hat{Q}_s(k+j+d)$  à l'instant k à j pas :

$$\begin{aligned} P_s(k+d+j) = & F_j(q^{-1})P_s(k) + H_j(q^{-1})\Delta V_{rq}(k-1) + \\ & + G_j(q^{-1})\Delta V_{rq}(k+j-1) + J_j(q^{-1})\xi(k+d+j) \end{aligned} \quad (V.15)$$

$$\begin{aligned} Q_s(k+d+j) = & F_j(q^{-1})Q_s(k) + H_j(q^{-1})\Delta V_{rd}(k-1) + \\ & + G_j(q^{-1})\Delta V_{rd}(k+j-1) + J_j(q^{-1})\xi(k+d+j) \end{aligned} \quad (V.16)$$

On peut négliger les bruits pour pouvoir écrire les prédictions des puissances à la forme suivante: nous devons utiliser

$$\begin{cases} P_s(k+d+j) = F_j(q^{-1})P_s(k) + H_j(q^{-1})\Delta V_{qr}(k-1) + G_j(q^{-1})\Delta V_{rq}(k+j-1) \\ Q_s(k+d+j) = F_j(q^{-1})Q_s(k) + H_j(q^{-1})\Delta V_{dr}(k-1) + G_j(q^{-1})\Delta V_{rd}(k+j-1) \end{cases} \quad (V.17)$$

### 4.3.2. Prédicteur des puissances optimales sous forme matricielle

Pour présenter les matrices de prediction de la puissance active et reactive, Nous devons utiliser les matrices de puissances de reference active  $P_{sref}$  et reactive  $Q_{sref}$ , les polynômes à solutions uniques des deux équations Diophantine et les deux tensions rotoriques  $V_{rq}$  et  $V_{rd}$ .

$$\begin{cases} P_{sref} = [P_{sref}(k+d+N_1) \dots P_{sref}(k+d+N_2)]^T \\ Q_{sref} = [Q_{sref}(k+d+N_1) \dots Q_{sref}(k+d+N_2)]^T \end{cases} \quad (V.18)$$

Sachant que

$$\begin{cases} f(q^{-1}) = [F_{N_1}(q^{-1}) \dots F_{N_2}(q^{-1})]^T \\ h(q^{-1}) = [H_{N_1}(q^{-1}) \dots H_{N_2}(q^{-1})]^T \end{cases} \quad (V.19)$$

$$\begin{cases} \tilde{V}_{rq} = [\Delta V_{rq}(k) \dots \Delta V_{rq}(k+N_u-1)]^T \\ \tilde{V}_{rd} = [\Delta V_{rd}(k) \dots \Delta V_{rd}(k+N_u-1)]^T \end{cases} \quad (V.20)$$

On conclue les prédictions des puissances optimales sous forme matricielle :

$$\begin{cases} \tilde{P}_s = G\tilde{V}_{rq} + f(q^{-1})P(k) + h(q^{-1})\Delta V_{rq}(k-1) \\ \tilde{Q}_s = G\tilde{V}_{rd} + f(q^{-1})P(k) + h(q^{-1})\Delta V_{rd}(k-1) \end{cases} \quad (V.21)$$

### 4.4. CRITERE QUADRATIQUE MATRICIEL

La minimisation du critère se base sur la mise sous forme matricielle de la fonction de coût équation (V.6) :

$$J_{GPC} = [G\tilde{u} + f y(k) + h \Delta u(k-1) - \omega]^T [G\tilde{u} + f y(k) + h \Delta u(k-1) - \omega] + \lambda \tilde{u}^T \tilde{u} \quad (V.22)$$

Nous pouvons représenter la fonction de coût des deux puissances sous forme matricielle :

$$J_{P_s} = [G\tilde{V}_{rq} + f P_s(k) + h \Delta V_{rq}(k-1) - P_{sref}]^T [G\tilde{V}_{rq} + f P_s(k) + h \Delta V_{rq}(k-1) - P_{sref}] + \lambda \tilde{V}_{rq}^T \tilde{V}_{rq} \quad (V.23)$$

$$J_{Q_s} = [G\tilde{V}_{rd} + f Q(k) + h \Delta V_{rd}(k-1) - Q_{sref}]^T [G\tilde{V}_{rd} + f Q(k) + h \Delta V_{rd}(k-1) - Q_{sref}] + \lambda \tilde{V}_{rd}^T \tilde{V}_{rd} \quad (V.24)$$

#### 4.5. MINIMISATION DE LA FONCTION DE COUT

La commande optimale s'obtient enfin par minimisation analytique du critère sous forme matricielle de la fonction de coût,  $\frac{\partial J}{\partial \tilde{u}} = 0$ . Ce qui conduit à la séquence optimale de commandes futures [71][74] :

$$\tilde{u} = M[\omega - f(q^{-1})y(k) - h(q^{-1})\Delta u(k-1)] \quad (V.25)$$

$$\text{Avec : } M = [G^T G + \lambda I_{N_u}]^{-1} G^T = \begin{bmatrix} m_1^T \\ m_2^T \\ \cdot \\ m_{N_u}^T \end{bmatrix} \quad (V.26)$$

$$\tilde{u} = [\Delta u(k)_{opt}, \dots, \Delta u(k + N_u - 1)_{opt}]^T \quad (V.27)$$

De façon classique en commande prédictive généralisée, seule la première valeur de la séquence, équation (V.14) est appliquée au système, selon le principe de l'horizon fuyant [76]:

$$u_{opt}(k) = u_{opt}(k-1) - m_1^T [f(q^{-1})y(k) + h(q^{-1})\Delta u_{opt}(k-1) - \omega] \quad (V.28)$$

Avec :  $m_1^T$  premier ligne de la matrice M .

Cela nous conduit à écrire les lois de commande optimale des séquences futures

$$\begin{cases} \tilde{V}_{qr} = [G^T G + \lambda I_{N_u}]^{-1} G^T [P_{sref} - f(q^{-1})P_s(k) - h(q^{-1})\Delta V_{rq}(k-1)] \\ \tilde{V}_{dr} = [G^T G + \lambda I_{N_u}]^{-1} G^T [Q_{sref} - f(q^{-1})Q_s(k) - h(q^{-1})\Delta V_{rd}(k-1)] \end{cases} \quad (V.29)$$

#### 5. STRUCTURE RST DU REGULATEUR

A partir des relations (V.17) (V.18) et (V.19) on peut réaliser le régulateur équivalent (représentation polynomiale). La figure 5 représente la structure RST classique que nous permet l'implantation de la loi de commande par une simple équation aux différences [78] [79]:

$$\begin{cases} \Delta u(k)(m_1^T h q^{-1}) = -m_1^T f y(k) + m_1^T \omega \\ S(q^{-1})\Delta u(k) = -R(q^{-1})y(k) + T(q^{-1})\omega(k + N_2) \end{cases} \quad (V.30)$$

Les trois polynômes prennent la forme suivante :

$$\begin{cases} S(q^{-1}) = (1 + m_1^T h(q^{-1})q^{-1}) \\ R(q^{-1}) = m_1^T f(q^{-1}) \\ T(q^{-1}) = m_1^T [q^{-N_2+N_1} \quad q^{-N_2+N_1+1} \quad \dots \quad 1]^T \end{cases} \quad (V.31)$$

Notons que le polynôme  $T(q^{-1})$  est volontairement choisi ici causal (puissance de  $q^{-1}$ ), en considérant que le signal de consigne est  $w(k+d+N_2)$  et non  $w(k+d)$ , mais habituellement  $T(q)$  renferme la structure non causale (puissances positives de  $q$ ) inhérente à la commande prédictive.

Sachant que :

$$\text{degré}[S(q^{-1})] = \text{degré}[B(q^{-1})]$$

$$\text{degré}[R(q^{-1})] = \text{degré}[A(q^{-1})]$$

$$\text{degré}[T(q^{-1})] = \text{degré}[N_2 - N_1]$$

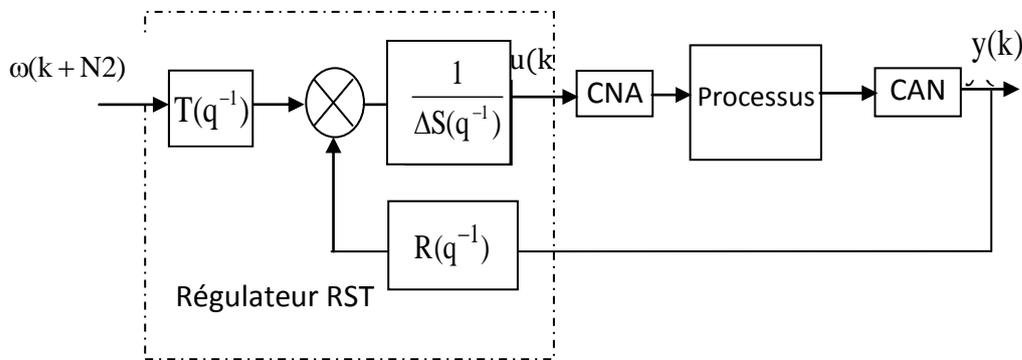


Fig.5 Structure du régulateur RST.

### 5.1. FONCTION DE TRANSFERT EN BOUCLE FERMEE

La structure du régulateur RST (fig.5) permet de déduire les fonctions de transfert entrée/sortie et perturbation/sortie, de façon à examiner l'influence du polynôme  $C(q^{-1})$  sur les transferts en boucle fermée [80] [81]. Notons que  $C(q^{-1})$  est choisi au début égal à un, ensuite le polynôme  $C(q^{-1})$  est différent de 1 en fixant le délai  $d=1$ .

A partir de l'équation (V.1) et (V.22) avec  $C(q^{-1}) \neq 1$ , la boucle fermée est donnée par :

$$\begin{cases} A(q^{-1})\Delta(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})\Delta u(k-1) + C(q^{-1})\zeta(k) \\ S(q^{-1})\Delta u(k-1) = T(q^{-1})\omega(k+N_2-1) - R(q^{-1})y(k-1) \end{cases} \quad (V.32)$$

On aboutir à :

$$\left( A(q^{-1})S(q^{-1})\Delta(q^{-1}) + B(q^{-1})R(q^{-1})q^{-1} \right) y(k) = B(q^{-1})T(q^{-1})\omega(k + N_2 - 1) + S(q^{-1})C(q^{-1})\zeta(k) \quad (V.33)$$

On note que le polynôme caractéristique de la boucle fermée est :

$$P_c(q^{-1}) = A(q^{-1})S(q^{-1})\Delta(q^{-1}) + B(q^{-1})R(q^{-1})q^{-1} \quad (V.34)$$

En remplaçant  $R(q^{-1})$  et  $S(q^{-1})$  par les expressions en équation (V.22), on a :

$$S(q^{-1}) = C(q^{-1}) + q^{-1}m_1^T h = C(q^{-1}) + \sum_{i=N_1}^{N_2} \alpha_i q^{-1} H_i(q^{-1}) \quad (V.35)$$

$$R(q^{-1}) = m_1^T f = \sum_{i=N_1}^{N_2} \alpha_i F_i(q^{-1})$$

$$\text{Avec : } m_1 = [\alpha_{N_1} \ \alpha_{N_1+1} \dots \ \alpha_{N_2}]^T$$

$$P_c(q^{-1}) = A(q^{-1}) \left( C(q^{-1}) + \sum_{i=N_1}^{N_2} \alpha_i q^{-1} H_i(q^{-1}) \right) \Delta(q^{-1}) + B(q^{-1}) \left( m_1^T f = \sum_{i=N_1}^{N_2} \alpha_i F_i(q^{-1}) \right) q^{-1} \quad (V.36)$$

Afin d'alléger les notations, un polynôme  $X(q^{-1})$  sera simplement noté  $X$ .

$$P_c = \Delta AC + \sum_{i=N_1}^{N_2} \alpha_i q^{-1} (\Delta A H_i + B F_i) = C \left[ \Delta A + \sum_{i=N_1}^{N_2} \alpha_i q^{-1} \left( \frac{\Delta A H_i}{C} + \frac{B F_i}{C} \right) \right] \quad (V.37)$$

A partir de l'équation (V.5), on trouve :

$$\frac{\Delta A H_i}{C} = q^{-1} B - \frac{F_i B}{C} - \Delta q^i A G_i \quad (V.38)$$

Il vient, en substituant dans la relation précédente :

$$P_c = \Delta A S + q^{-1} B R = C \left[ \Delta A + \sum_{i=N_1}^{N_2} \alpha_i q^{i-1} (B - \Delta A G_i) \right] = C A_c \quad (V.39)$$

Où  $A_c = \left[ \Delta A + \sum_{i=N_1}^{N_2} \alpha_i q^{i-1} (B - \Delta A G_i) \right]$  dépend des paramètres de réglage  $N_1$ ,  $N_2$ ,

$N_u$  et  $\lambda$ .

Le polynôme  $C(q^{-1})$  se retrouve donc en facteur du polynôme caractéristique. En revenant sur le transfert en boucle fermée équation (V.18) et en décomposant  $T(q^{-1})$  en deux parties:

$$T(q^{-1}) = C(q^{-1})m_1^T [q^{-N_2+N_1} \quad q^{-N_2+N_1-1} \quad \dots \quad 1] = C(q^{-1})T_1(q^{-1}) \quad (V.40)$$

Et la boucle fermée :

$$y(k) = \frac{B(q^{-1})T_1(q^{-1})}{A_c(q^{-1})} \omega(k + N_2 - 1) + \frac{S(q^{-1})}{A_c(q^{-1})} \zeta(k) \quad (V.41)$$

On constate avec cette dernière expression que le transfert, en boucle fermée entre l'entrée et la sortie, n'est pas modifié par le polynôme  $C(q^{-1})$ . Il faut remarquer que cela n'est vrai toutefois que dans le cas où le modèle est parfait. D'autre part,  $C(q^{-1})$  a une influence sur le transfert entre la perturbation et la sortie, la relation (V.32) devient :

$$y(k) = \frac{B(q^{-1})T_1(q^{-1})}{A_c(q^{-1})} \omega(k + N_2 - 1) + \frac{\Delta(q^{-1})S(q^{-1})}{C(q^{-1})A_c(q^{-1})} d(k) \quad (V.42)$$

D'autre part, la relation (V.6) avec  $C(q^{-1}) \neq 1$  devient :

$$\hat{y}(k+j) = \frac{F_j(q^{-1})}{C(q^{-1})} y(k) + \frac{H_j(q^{-1})}{C(q^{-1})} \Delta u(k-1) + G_j(q^{-1}) \Delta u(k+j-1) \quad (V.43)$$

Alors on peut trouver pour les deux puissances :

$$\hat{P}_s(k+j) = \frac{F_j(q^{-1})}{C(q^{-1})} P_s(k) + \frac{H_j(q^{-1})}{C(q^{-1})} \Delta V_{qr}(k-1) + G_j(q^{-1}) \Delta V_{qr}(k+j-1) \quad (V.44)$$

$$\hat{Q}_s(k+j) = \frac{F_j(q^{-1})}{C(q^{-1})} Q_s(k) + \frac{H_j(q^{-1})}{C(q^{-1})} \Delta V_{dr}(k-1) + G_j(q^{-1}) \Delta V_{dr}(k+j-1) \quad (V.45)$$

On remarque clairement le rôle d'observateur que joue le polynôme  $C(q^{-1})$ . En fait, le polynôme caractéristique PC, relation (V.32), est décomposé en un polynôme de commande  $C(q^{-1})$  et en un polynôme observateur correspondant au polynôme  $C(q^{-1})$ . On peut aussi noter que ce résultat est classique pour la détermination de prédictions optimales. Il met clairement en évidence que le polynôme  $C(q^{-1})$  permet de modifier la dynamique de l'observateur (le prédicteur de la sortie) de la même façon que dans un filtre de Kalman [11][17]. Ainsi, l'ajustement de  $C(q^{-1})$  dans le modèle figure 4 permet de conférer au correcteur des propriétés de filtrage du bruit. On peut aussi envisager de décrire la commande GPC en raisonnant avec des représentations dans l'espace d'état avec un observateur d'état de Kalman [68][82]. Dans ce cas, la boucle fermée sera décomposée en un retour d'état défini

par AC et un observateur correspondant au polynôme  $C(q^{-1})$ . Lorsque  $C(q^{-1}) = 1$ , les pôles de l'observateur de la loi de commande sont placés à l'origine.

## 6. CHOIX ET INFLUENCE DES PARAMETRES DE REGLAGE

En général, il n'y a pas de relation empirique pour définir les quatre paramètres de réglage du critères quadratique pour "indicateurs" classiques de automatiques, tels que des marges de stabilité ou de la bande passante.

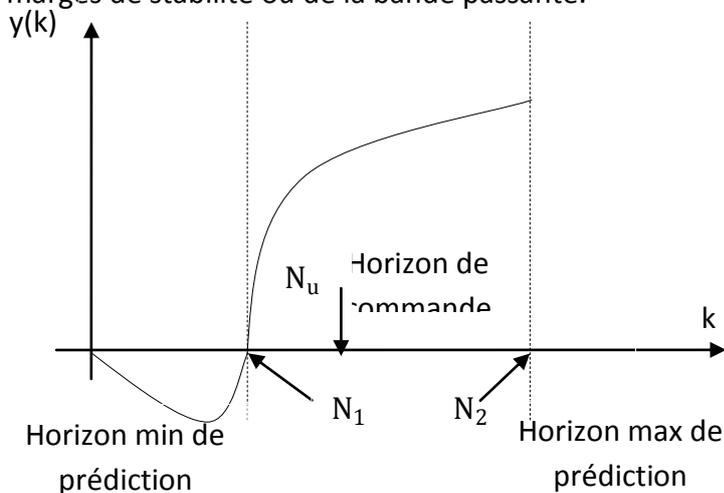


Fig.6 Paramètres de réglage de GPC

### 6.1. CHOIX ET INFLUENCE DE L'HORIZON INITIAL $N_1$

La modification de l'horizon d'initialisation permet d'ajuster la fenêtre d'optimisation à une zone précise de la réponse. On peut ainsi choisir de ne pas faire intervenir les premiers échantillons dans l'optimisation lorsque, par exemple, le système contient plusieurs retards purs. Le produit  $N_1 T_e$  ( $T_e$  période d'échantillonnage) est choisi égal au retard pur du système. Ainsi, pour un système ne présentant pas de retard ou un retard mal connu ou variable,  $N_1$  est choisi égal à 1. Cependant, dans le cas d'un système à déphasage non minimal,  $N_1$  est pris égal à la valeur  $N_0$ . En pratique, on prendra généralement  $N_1 = d + 1$  [74][18](fig.7).

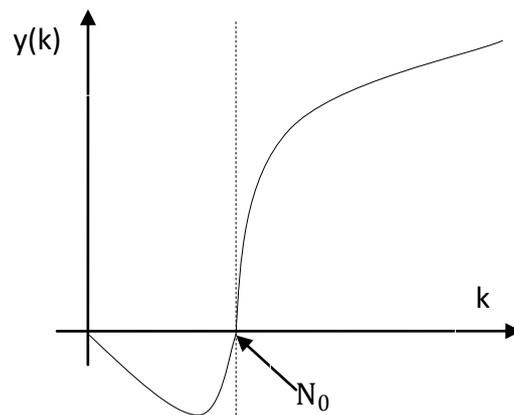


Fig.7 Valeur de  $N_1$  pour un système à déphasage non minimal

### 6.2. CHOIX INFLUENCE DE L'HORIZON FINAL $N_2$

L'horizon final ou l'horizon maximal de sortie est choisi en général tel que le produit  $N_2 T_e$  ( $T_e$  période d'échantillonnage) soit égal au temps de réponse désirée du système. Notons que plus  $N_2$  est grand, plus le temps de calcul est long. La figure 8 présente le choix de  $N_2$  dans le cas d'un système à déphasage non minimal.

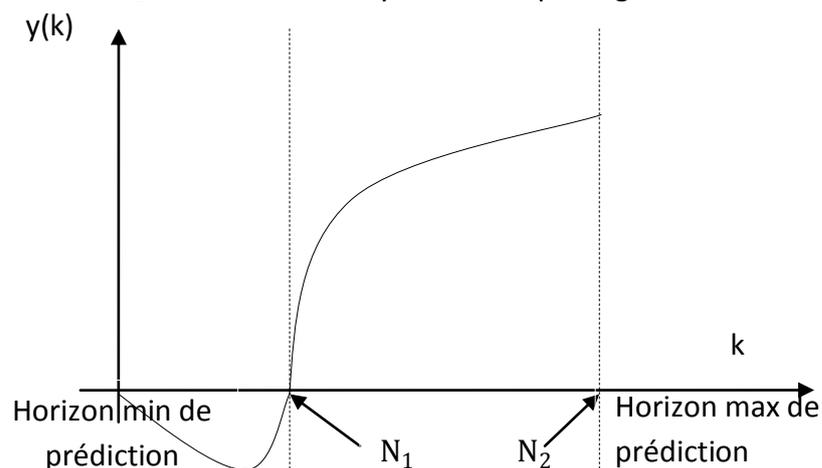


Fig.8 Valeur de  $N_2$  pour un système à déphasage non minimal

### 6.3. CHOIX INFLUENCE DE L'HORIZON DE COMMANDE $N_u$

On choisit en général un horizon de commande  $N_1 < N_u \ll N_2$  relativement réduit proche de l'horizon initial. Ce choix est entièrement justifié si le signal de référence de la boucle ne varie pas. Dans ce cas, seules les perturbations, qui par

nature sont aléatoires, sont susceptibles de modifier la sortie du système. Il n'est donc nécessaire de calculer un nombre important de commandes à l'avance étant donné que seule la première est effectivement appliquée au système et qu'aucune prédiction ne peut être faite sur les perturbations.

Par contre, si le signal de référence n'est pas constant, le fait de ne faire intervenir dans l'optimisation qu'un nombre limité de commandes par rapport à l'horizon de prédiction  $N_2$  a des effets indésirables sur la réponse. Ainsi, lorsque l'échelon commence à entrer dans la zone supérieure de la fenêtre d'optimisation (c'est-à-dire que l'instant d'occurrence de la prédiction de l'échelon est  $N_2 + k$ ), si  $N_u \leq N_2$ , il est impossible d'atteindre la référence à l'instant  $N_2 + k$  en seulement  $N_u$  variations de la consigne puisque  $\Delta u(k) = 0$  si  $N_u \leq k$ . L'erreur quadratique

$$J_{\text{GPC}} = \sum_{N_1}^{N_2} \left[ \hat{Y}(k+d+j) - w(k+d+j) \right]^2$$

prévu de l'échantillon est éloigné de l'instant  $N_u + k$  de la dernière variation de la commande.

La minimisation de l'erreur conduit donc à générer des commandes qui sont certes optimales au sens du critère  $J_{\text{GPC}}$ , mais qui sont très éloignées de la réponse optimale obtenue grâce à un correcteur LOG. Néanmoins, on peut noter que le correcteur GPC tend vers le correcteur LOG lorsque  $N_u$  et  $N_2$  tendent vers l'infini.

#### 6.4. INFLUENCE DE $\lambda$

De tous les paramètres de réglage du GPC,  $\lambda$  est celui dont l'influence est la plus évidente. En effet, il permet de pondérer l'influence des commandes dans l'optimisation et ainsi permet de générer un correcteur plus ou moins *énergique* donc plus ou moins rapide ce paramètre est lié au gain du système, par la relation empirique :  $\lambda_{\text{opt}} = \text{trace}(H^T H)$

### 7. COMMANDE PREDICTIVE E LA MADA

Nous avons simplifié la machine asynchrone double alimentation et représenté son modèle que nous avons commandé dans le chapitre IV par la commande vectorielle, maintenant nous allons essayer de commander ce modèle représenté dans la figure 3 du chapitre IV par la commande prédictive généralisé avec une seule boucle de commande sans négliger les termes de couplage. Deux régulateur GPC seront utilisé le premier pour contrôler la puissance active et le deuxième pour

contrôler la puissance réactive. La figure 9 représente le système complet commandé par la GPC.

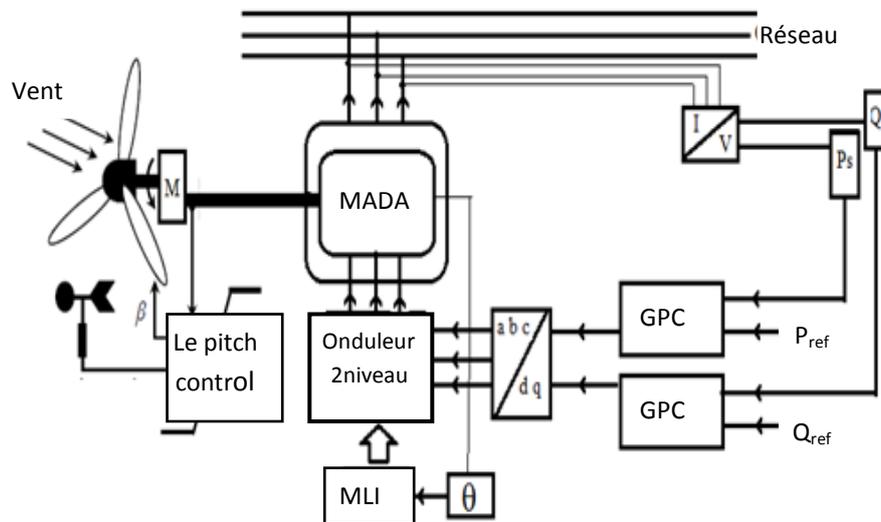


Fig.9 Commande prédictive généralisée de la MADA intégré dans une éolienne.

Le modèle de la puissance active utilisée est représenté par une fonction de transfert continue :

$$\text{fonction de transfert} = \frac{7.82}{0.1965s + 0.0133} \quad (V.34)$$

La commande GPC nécessite l'existence d'un modèle numérique de comportement future du système (ici une machine asynchrone). Ce modèle peut être obtenu par une discrétisation de la fonction de transfert continue du modèle équation (V.34) (transformée en z) ou par une identification préalable hors ligne du système. Pour nous, nous avons choisi la discrétisation de la fonction de transfert continue avec Période d'échantillonnage  $T_s=0.001$

Les paramètres du correcteur GPC du critère quadratique sont:

Pour la puissance active :  $N_1 = 1; N_2 = 31, N_u = 2, \lambda = 44$

Pour la puissance réactive :  $N_1 = 1; N_2 = 30, N_u = 2, \lambda = 53$

## 7.1. RESULTAT DE SIMULATION

### 7.1.1. Réponse des puissances et des courants

La simulation du système a été réalisée sous MATLAB/SIMULINK afin d'évaluer ses performances. Nous avons simulé le modèle de la GADA pilotée par la commande prédictive généralisée et alimentée par un onduleur de son côté rotorique en supposant que la vitesse du vent a un gisement de la région de Adrar représenté

dans le chapitre III, (Fig.3) afin d'analyser le découplage réalisé pour le contrôle des deux puissances active et réactive et la robustesse de cette commande.

Le premier essai consiste à réaliser des échelons de puissance active et réactive alors que la machine est entraînée.

L'objectif principal de ce test est l'étude du contrôleur prédictive et la comparer avec les deux commandes vectorielles citées dans le chapitre précédent en terme suivie des consignes, la qualité de la réponse et robustesse.

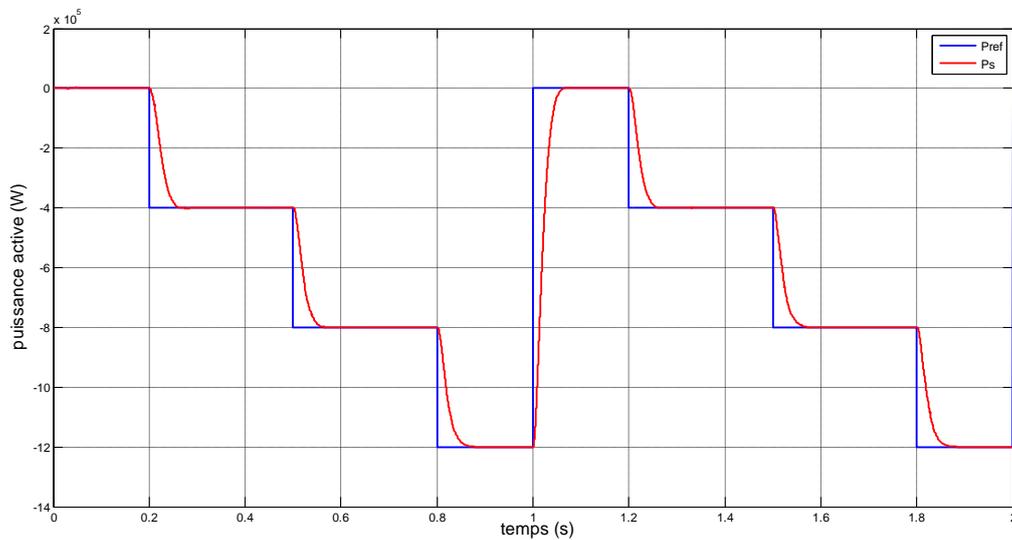


Fig.10 réponse de la puissance active par la commande GPC.

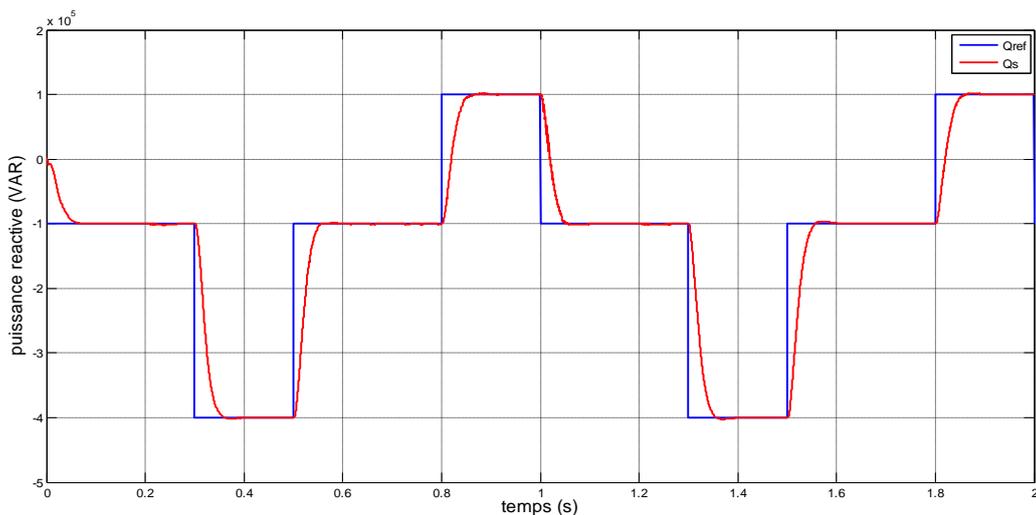


Fig.11 réponse de la puissance réactive par la commande GPC

Les résultats de simulation obtenus sont montrés dans les figures 10 et 11. Elles représentent les réponses de la commande prédictive généralisée aux consignes de la puissance active et réactive. On remarque que les références sont parfaitement suivies par la machine asynchrone double alimentation. Les réponses sont meilleures

que celles des deux stratégies directe ou indirecte régulé classiquement (régulateurs PI) en termes suivie des consignes et même les perturbations et les oscillations sont négligeables par rapport au régulateur PI.

On peut remarquer l'absence de l'effet du couplage entre les deux axe de puissances puissance active et réactive.

On constate que les composantes directes du courant statorique et du courant rotorique ainsi que les composantes en quadratiques de ces courants présentent les mêmes allures, ce qui reflète l'équation III.64.

Les composantes en quadratique du courant ont la même forme que la puissance active et les composantes directes du courant ont la même forme que la puissance réactive, alors on peut dire que la puissance active est contrôlée par les composantes en quadratique du courant et la puissance réactive est contrôlée par les composantes directes du courant. Par ailleurs, les résultats obtenus montrent que les courants statoriques de phases ont des formes presque sinusoïdales, ce qui signifie qu'une énergie de bonne qualité est fournie au réseau.

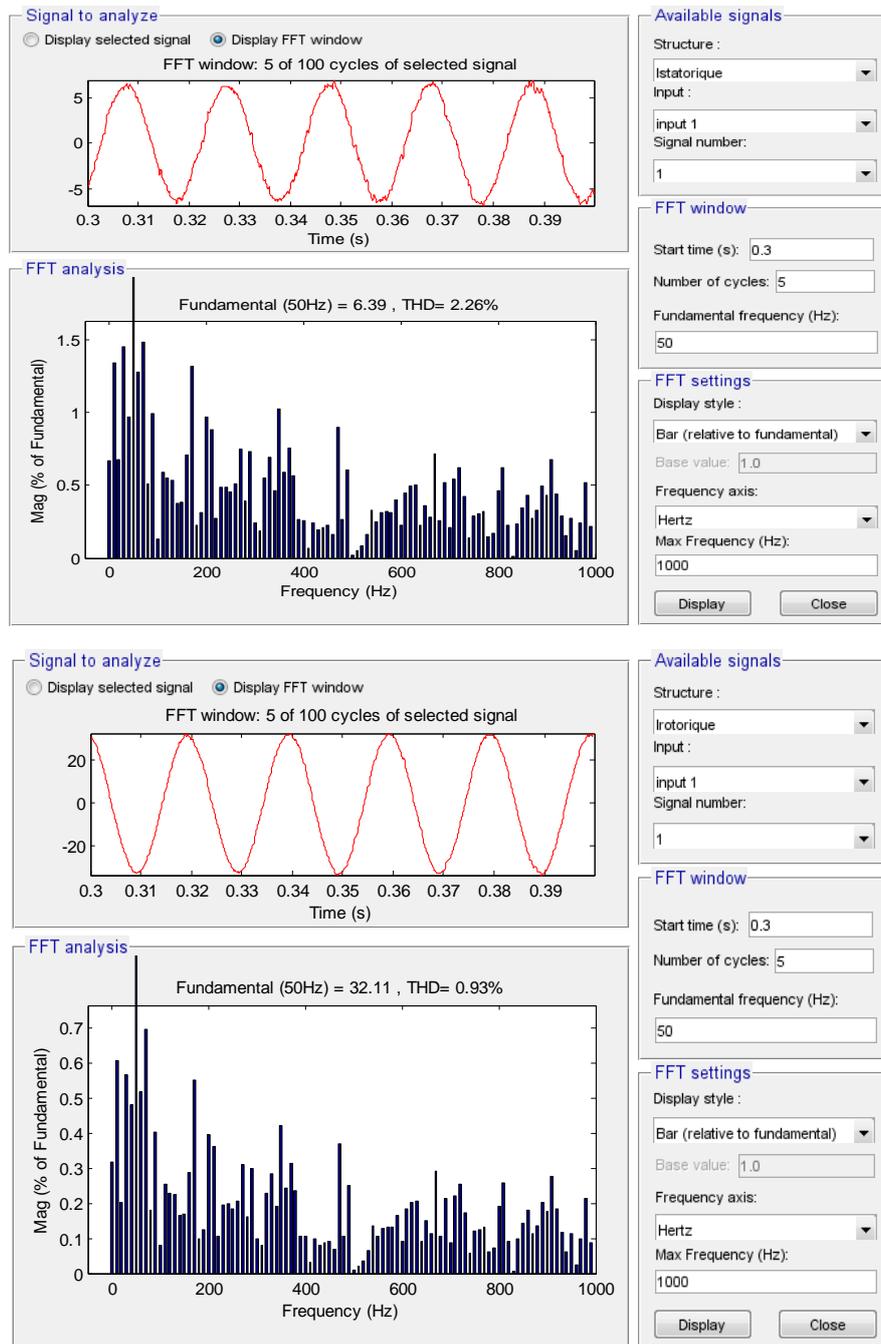


Fig.12 Spectre d'harmonique d'une phase du courant statorique et rotorique pour la GPC

D'un autre côté, on remarque d'après la figure 12 qui illustre les spectres d'harmoniques d'une phase du courant statorique et rotorique de la GADA pour 3 cycles de fonctionnement commençant par 0.3s de 5 cycle, de la GPC de contrôleurs, obtenu en utilisant la transformée de fourrier rapide (FFT) que le taux d'harmonique (THD) est réduit (THD = 0.93%) pour les courant rotorique et (THD = 2.26%) pour les courant statorique. Ces résultats nous permettent de conclure que le contrôleur GPC nous fournis des courants propres et parfaitement sinusoïdales.

## 7.1.2. Test de robustesse

Pour comparer la robustesse de la GPC et la commande par PI on fait varier les paramètres de la MADA, pour s'approcher à l'environnement et au mode d'exploitation de la machine, et imposer les mêmes conditions que nous avons imposé sur la commande classique. Le changement des paramètres est naturel à cause de certains phénomènes intérieurs (échauffement, variation de la charge, saturation de circuits magnétiques, forme de l'entrefer, effet pelliculaire, régime défluxé, ... etc.) ou extérieurs (perturbation, vibration, température de l'environnement, magnétisme des autres machines, facteur de temps,....etc.)

Pour réaliser ce test de robustesse après le changement des paramètres de la MADA des deux méthodes de commande avec :

- Résistances  $R_s$  et  $R_r$  multipliées par 2 ;
- Inductances  $L_s$ ,  $L_r$  et  $M$ , divisées par 2 ;

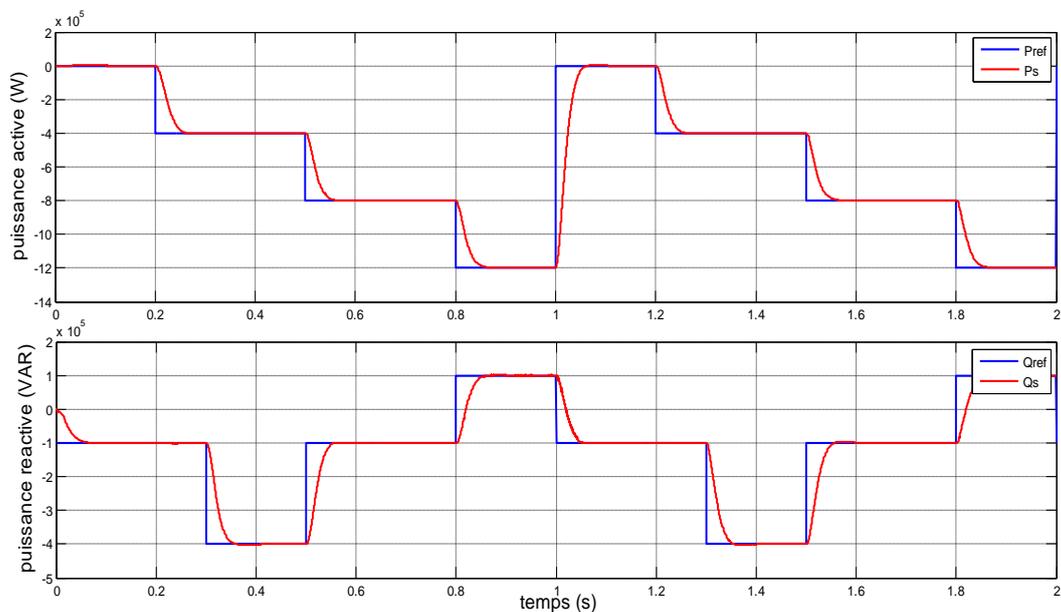


Fig.13 La commande GPC vis-à-vis aux variations paramétriques de la MADA.

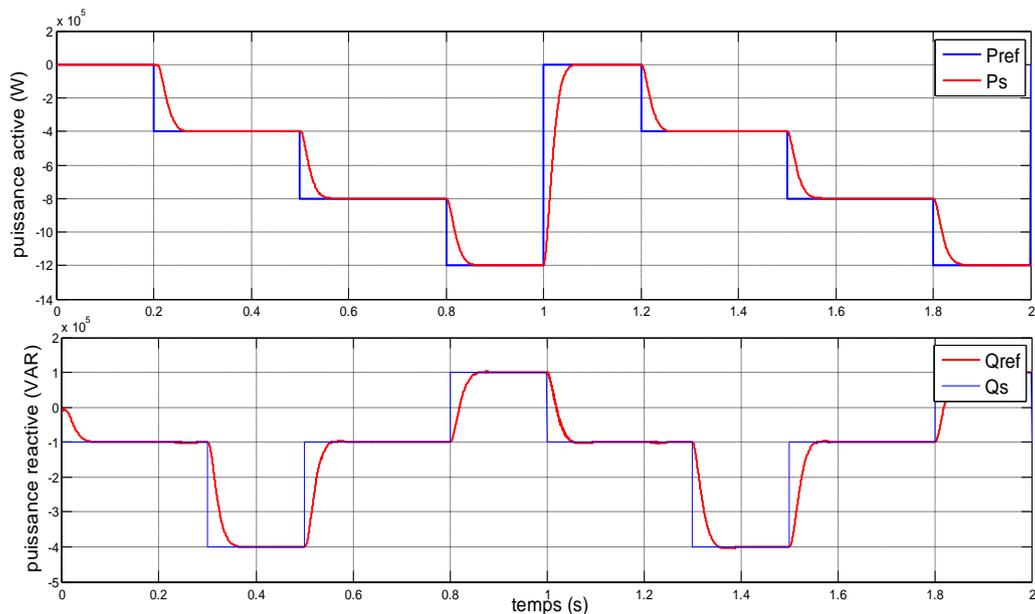


Fig.14 La commande GPC vis-à-vis aux variations paramétriques de la MADA.

Dans les résultats représentés dans les figures 12 et 13 le test montre la robustesse de la commande GPC vis à vis des changements paramétriques même dans le régime transitoire.

La réponse de la puissance active ou réactive ne change pas et s'engendre que des perturbations presque négligeables alors la commande vectorielle direct et indirect ont montré une grande sensibilité contre le changement paramétrique.

## 8. CONCLUSION

La commande prédictive est l'une des commandes les plus robustes utilisées dans le monde à cause de sa particularité de prévoir les variations paramétriques et les réponses des systèmes a commandé, dans notre cas la puissance active et réactive. Au début de ce chapitre on a expliqué cette commande et ces algorithmes puis on l'a appliqué sur le modèle simplifié vu précédemment pour contrôler la puissance électrique produite.

Les résultats des réponses des puissances sont très satisfaisants même contre les changements paramétriques, une preuve d'une grande robustesse de cette commande car même après l'application d'une variation paramétrique de 100% pour la résistance et l'inductance, les réponses sont toujours les mêmes avec les paramètres utilisés en premier temps. Enfin on a appliqué le test de THD pour l'analyse spectrale des courants que nous a montré une très bonne qualité de la forme d'onde du courant rotorique et statorique avec de très faible taux de distorsion

## CHAPITRE VI

# COMMANDE ADAPTATIVE AVEC MODELE DE REFERENCE DE LA GADA

### 1. INTRODUCTION

En présence de variations importantes des paramètres du système, le maintien d'un haut niveau de performances peut être impossible à atteindre avec un régulateur standard conçu au préalable sur un système dit 'nominal', même si la loi de commande prédictive assure de façon intrinsèque une certaine robustesse.

Concevoir un système asservi avec de 'bonnes' performances nécessite que le correcteur de la boucle de commande soit toujours convenablement réglé, non seulement pour un point de fonctionnement particulier appelé point nominal, mais aussi pour tout un ensemble de points de fonctionnement le plus vaste possible autour du point nominal.

Dans cette partie de ma thèse on va développer un régulateur ajustable automatiquement 'Commande Adaptative' caractérisée par la capacité d'ajuster ses paramètres aux comportements dynamique et statique du procédé dans notre cas la génératrice asynchrone double alimentation

En conséquence, l'objectif de la commande Adaptative est l'ajustement automatique en ligne et des régulateurs des boucles de commande, afin de réaliser ou maintenir de façon identique un certain niveau de performances, quand les paramètres du procédé à commander varient dans le temps. Un système adaptatif peut également s'envisager comme une structure à deux boucles, une boucle principale classique qui prend en compte les variations des signaux d'entrée et de sortie, et une boucle secondaire qui réagit aux variations des paramètres du processus : c'est elle qui rend le système adaptatif. Les différentes méthodes de commande adaptative se différencient par la structure choisie pour réaliser la remise à jour en temps réel des paramètres du régulateur en fonction des variations du processus à commander.

On peut distinguer la commande adaptative directe ou avec model de référence et la commande adaptative indirecte.

Nous avons choisi la première commande caractérisée par sa simplicité et un système premier ordre "le modèle de référence".

## 2. HISTORIQUE DE LA COMMANDE ADAPTATIVE

Un régulateur fixe ne pouvait pas toujours fournir un comportement acceptable d'un système en toute situation avec le changement des paramètres et le fonctionnement en régime transitoire. La notion d'ajustement automatique des paramètres d'un régulateur commence à pointer vers la fin des années 40. A ce moment précis et jusqu'en 1960, le terme de 'Commande Adaptative' n'a pas encore la signification que l'on connaît aujourd'hui. C'est ainsi que se développe, pendant cette période, la technique de 'commande à gains programmés', qui s'applique avec succès si le comportement du processus évolue en fonction de conditions extérieures connues et mesurables. Les limites de cette stratégie sont cependant atteintes assez rapidement, par exemple dès que le processus change sous l'effet d'autres perturbations que celles précédemment définies [83].

Le premier régulateur numérique adaptatif apparaît en 1981 avec l'apparition des ordinateurs puis des microprocesseurs

La commande adaptative indirecte avec identification du modèle (MIAC), encore appelée commande auto-ajustable, a été introduite dès 1958 par Kalman. Cette stratégie est avant tout conçue selon les principes de séparation et d'équivalence certaine [84]. Un régulateur adaptatif est élaboré selon le principe de séparation, si l'estimation du modèle du procédé est effectuée séparément de la conception du régulateur, et selon le principe de l'équivalence certaine reposant sur l'hypothèse que les paramètres du modèle estimé sont identiques à ceux du procédé réel. Pour l'élaboration du régulateur, aucune erreur d'estimation n'est donc prise en compte. Ceci peut se justifier théoriquement si les paramètres du processus sont connus, les variables d'état d'un processus linéaire estimées et un critère quadratique de performances utilisé, Bar-Shalom et Tse, [83].

La commande adaptative directe à modèle de référence (MRAC) que nous allons développer a été proposée pour la première fois en 1961 [84] se basant sur la minimisation d'un indice de performances, approche qui sera plus tard connue sous la règle de conception du MIT. La stratégie MRAC spécifie la forme désirée de la réponse du processus à un signal de commande par l'intermédiaire d'un modèle de référence bien défini.

Ensuite, un mécanisme d'adaptation élabore, à partir de la sortie du processus et de la sortie du modèle, un jeu de paramètres conçu de telle sorte que la différence entre ces deux sorties tend vers zéro.

### 3. MODE DE FONCTIONNEMENT DE LA COMMANDE ADAPTATIVE

Les variations non-mesurables et inconnues des paramètres d'un procédé affectent les performances d'un système de commande conventionnel à contre-réaction utilisant un régulateur à paramètres fixes, ces variations sont provoquées par des perturbations paramétriques agissant sur le procédé ou les systèmes électriques en plus des perturbations agissant sur les variables à réguler [86].

Nous pouvons donc distinguer deux types de perturbations:

- Perturbations agissant sur les variables à réguler.
- Perturbations paramétriques agissant sur les performances du système de commande.

La contre-réaction est essentiellement utilisée dans les systèmes de régulation conventionnels pour réduire (éliminer) l'effet des perturbations agissant sur les variables à réguler, pour réaliser ceci, on mesure les variables, on les compare aux valeurs désirées et les différences sont appliquées à l'entrée du régulateur qui engendre la commande appropriée.

Une approche conceptuellement similaire peut être considérée pour le problème du maintien des performances désirées d'un système de commande en présence de perturbations paramétriques, il faut définir d'abord un indice de performance (IP) du système qui est une mesure des performances du système (exemple: facteur d'amortissement pour des systèmes caractérisés par une fonction de transfert du 2ème ordre), il faut après mesurer cet IP et le comparer avec le IP désiré, l'écart entre l'IP désiré et l'IP mesuré va être traité par un mécanisme d'adaptation, la sortie du mécanisme d'adaptation va agir sur les paramètres du régulateur ou directement sur le signal de commande afin de modifier d'une manière appropriée les performances du système [87].

Le principe des systèmes de commande adaptative est illustré dans la figure 1.

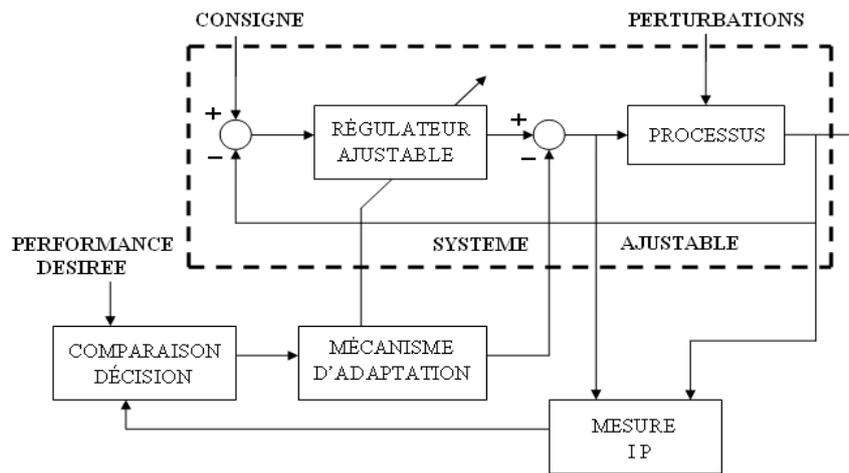


Fig.1 Le principe de la commande adaptative.

De la figure 1 nous pouvons considérer le mode de fonctionnement en général du système de commande adaptative.

Le système de commande adaptative mesure un certain indice de performance (IP) du système de commande et à partir de l'écart entre l'indice de performance désiré et l'indice de performance mesuré, le mécanisme d'adaptation modifie les paramètres du régulateur ajustable ou les signaux de commande afin de maintenir l'IP du système dans le voisinage des valeurs désirées.

Les système de commande à contre-réaction conventionnelle va réduire l'effet des perturbations agissant sur les variables à réguler mais ses performances dynamiques vont varier sous l'effet des perturbations paramétriques, un système de commande adaptative contient en plus d'une boucle de commande à contre-réaction ayant un régulateur à paramètres ajustables, une boucle supplémentaire qui agit sur les paramètres du régulateur afin de maintenir les performances du système en présence de variations des paramètres du procédé.

Cette boucle supplémentaire a aussi une structure à contre-réaction où la variable contrôlée est la performance de système de commande dit.

#### 4. TECHNIQUES DE LA COMMANDE ADAPTATIVE

Il existe plusieurs structure et schémas destinés à assurer des performances acceptables quand les paramètres du procédé sont inconnus ou varient dans le temps, mais les schémas de commande adaptative sont celles qui ont une boucle de contre-réaction sur la mesure ou a estimation en des performances satisfaisante.

La figure 2 représente le schéma des systèmes de commande adaptative en boucle ouverte utilisant des régulateurs à gain programmé programmée a base des relations entre certaines variables de l'environnement et les paramètres du système

par exemple la température de l'environnement et la résistance de notre machine les vibration de la machine et l'inertie de celle-ci., les valeurs des paramètres du régulateur sont lues dans une table associée aux mesures de l'environnement.

Ce système est en boucle ouvert parce que les modifications des performances causées par la modification des paramètres du régulateur ne sont pas mesurées et comparées avec les performances désirées, alors les performances de ces schémas peuvent être catastrophiques et indésirable si pour une raison ou une autre les relations entre les mesures de l'environnement et les paramètres dynamiques du procédé changent [87] [11].

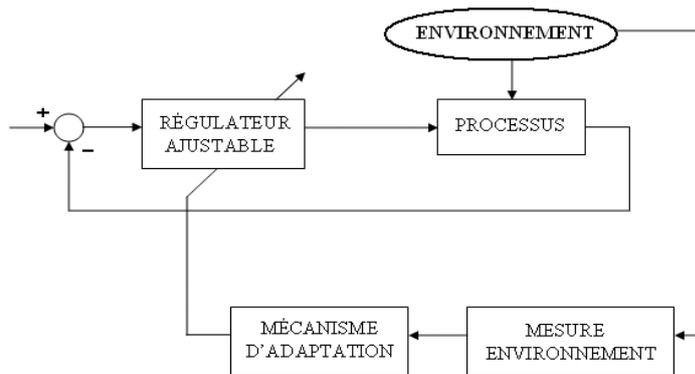


Fig.2 Commande adaptative a base mesure environnemental.

Trois approches ont été essentiellement considérées pour le développement des stratégies de commande adaptative destinées aux procédés à paramètres inconnus et/ou variables dans le temps[86].

- Approximations des stratégies de commande optimale stochastique « duale ».
- Systèmes de Commande Auto-ajustable (Self Tuning Control STC).
- Commande adaptative avec modèle de référence (Model Reference Adaptive Control MRAC).

Introduite par Felbaum (1963) la commande «duale» traite les paramètres inconnus comme des états additionnels du système ce qui transforme même un très simple problème de commande linéaire en un problème non-linéaire stochastique, le régulateur est composé d'un estimateur non-linéaire suivi par le régulateur, la stratégie de commande « duale » maintient un compromis entre la minimisation du critère d'estimation et du critère de commande.

Malheureusement cette technique est très difficile, trop compliquée et même les différentes approximations sont encore trop compliquées pour être appliquée à cause de la puissance de calcul requise, cette approche a néanmoins un intérêt théorique pour comprendre et évaluer les performances maximales qui peuvent être

obtenues par des techniques plus simple comme la commande auto-ajustable et la commande adaptative avec modèle de référence.

#### 4.1. COMMANDE AUTO-AJUSTABLE ET COMMANDE ADAPTATIVE A MODELE DE REFERENCE [88][89]

Les techniques de commande adaptative utilisées à ce jour en pratique et simples à mettre en œuvre sont la commande adaptative avec modèle de référence et la commande auto-ajustable

ces deux techniques ont un nombre important de points communs, de certains cas, les deux techniques conduisent à des schémas identiques, le schéma de commande adaptative avec modèle de référence a été originellement proposé par Whitaker (1958) et le schéma de commande (régulation) auto-ajustable a été originellement proposé par Kalman (1958), les premières applications de ces techniques remontent au début des années 70 .

Le développement de ces techniques est largement basé sur une bonne compréhension des aspects algébriques des différentes stratégies de commande linéaires, leur développement repose aussi sur l'hypothèse fondamentale suivante :

Pour toutes les valeurs possibles des paramètres du procédé on suppose qu'il existe un régulateur de structure donnée qui peut assurer la réalisation des performances désirées, le rôle de la boucle d'adaptation est uniquement limité à trouver les bonnes valeurs des paramètres de ce régulateur dans chaque cas.

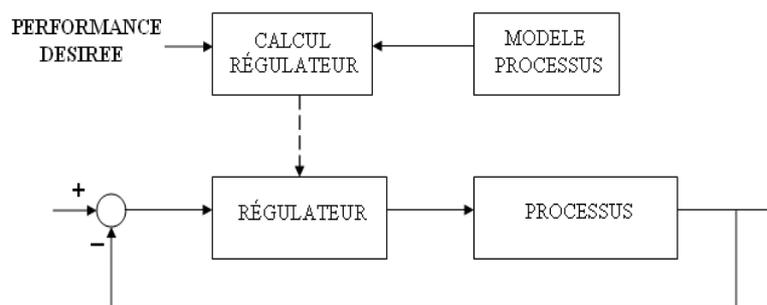


Fig.3 Schéma de base de la Commande adaptative

La philosophie fondamentale de calcul d'un régulateur (dans un environnement déterministe) représenté dans la figure (VI.3), on suppose la connaissance du modèle dynamique du procédé et des performances désirées, dans des nombreuses situations les performances désirées du système de commande à contre-réaction peuvent être spécifiées en termes de fonction de transfert (tant pour la poursuite que pour la régulation), dans ces cas le régulateur est calculé de telle sorte que pour

un modèle de procédé donné, le système en boucle fermé soit caractérisé par une fonction de transfert spécifiée a priori, mais cette fonction de transfert étant donnée, le problème du calcul du régulateur peut être reformulé sous la forme indiquée dans la figure 4 le modèle de référence n'est autre qu'une réalisation de la fonction de transfert désirée du système de commande en boucle fermée.

Dans ce cas, le calcul est fait afin que:

- L'erreur entre la sortie du procédé et la sortie du modèle soit identiquement nulle pour conditions initiales identiques.
- L'erreur initiale s'annule avec une dynamique pré-spécifiée (c'est la dynamique de la régulation).

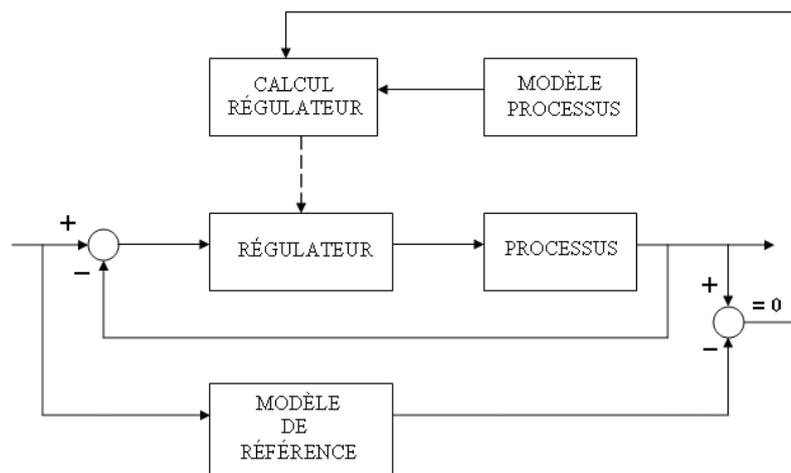


Fig.4 Schéma de base de la Commande adaptative avec model de référence

Quand les paramètres du procédé sont inconnus ou ils varient dans le temps, pour assurer la réalisation et/ou le maintien des performances désirées, les schémas donnés par les figures 3 et 4 conduisent naturellement aux schémas développées de commande adaptative représentés par les figures 5 et 6.

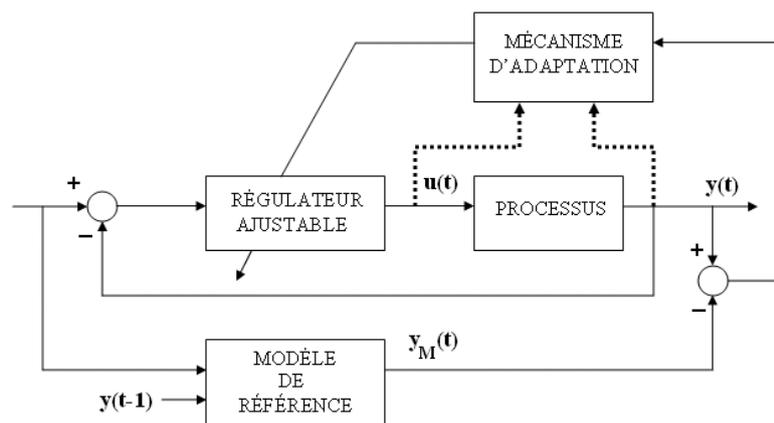


Fig.5 Schéma de base de la Commande adaptative avec model de référence explicite

Le schéma donné par la figure 5 est une extension du schéma donné dans la figure 4 de la commande adaptative avec model de référence et est appelé commande adaptative avec modèle de référence explicite (explicit MRAC), la différence entre la sortie du procédé et la sortie du modèle de référence est une mesure de la différence entre les performances désirée, cette information est utilisée par le mécanisme d'adaptation (qui reçoit aussi d'autres informations) pour ajuster automatiquement les paramètres du régulateur.

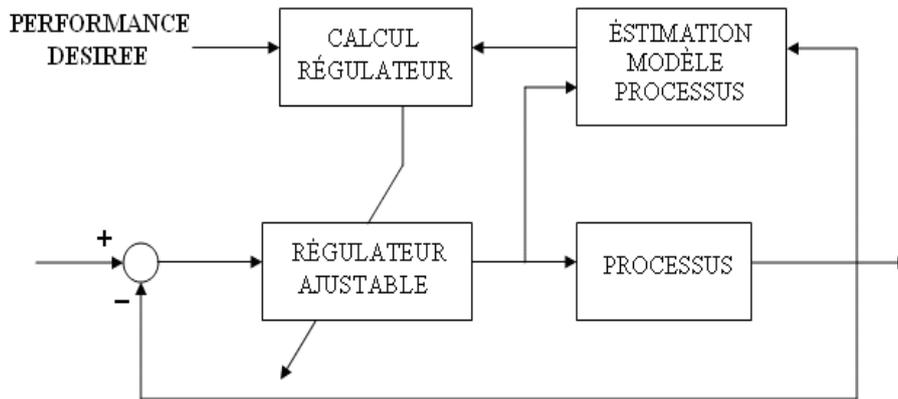


Fig.6 Schéma de base de la Commande adaptative auto ajustable.

La figure 6 est un schéma de commande auto-ajustable, il est une extension naturelle du schéma donné par la figure 3, le modèle du procédé servant pour le calcul est remplacé par un modèle estimé (identifié) en temps réel à partir des entrées et des sorties du procédé, en prenant en compte la structure des schémas d'identification en ligne, on a le schéma plus détaillé donné par la figure 7, en effet pour estimer les paramètres du procédé, à chaque instant on construit un prédicteur de la sortie du procédé et l'erreur de prédiction sert à adapter les paramètres du prédicteur, ce sont ces paramètres qui, à chaque pas, sont utilisés pour le calcul du régulateur.

#### 4.2. COMMANDE ADAPTATIVE PREDICTIVE DIRECTE ET INDIRECTE

Le schéma de commande adaptative avec modèle de référence explicite donné par la figure 5 est un schéma de commande adaptative "directe". Les paramètres du régulateur étant ajustés en une seule étape. Le schéma de commande auto-ajustable donné par la figure 6 est un schéma de commande adaptative "indirecte" car l'adaptation des paramètres du régulateur se fait en deux étapes [84] [85]:

- Estimation des paramètres du modèle du procédé.
- Calcul des paramètres du régulateur à partir des paramètres estimés.

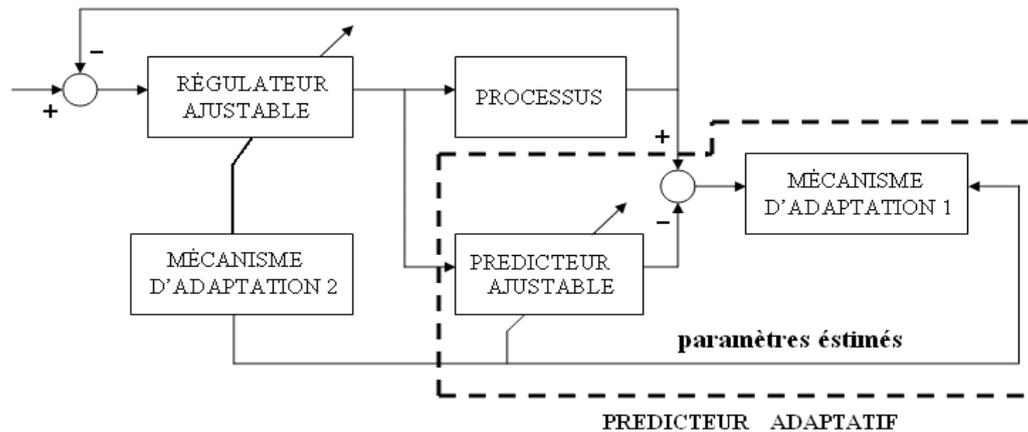


Fig.7 Commande adaptative avec modèle de référence avec un prédicteur ajustable.

Néanmoins dans de nombreux cas, par une re-paramétrisation appropriée du prédicteur, l'algorithme d'adaptation paramétrique utilisé dans le schéma donné par la figure 7 pour l'ajustement du prédicteur pourra estimer directement les paramètres du régulateur, l'idée de base dans la re-paramétrisation est de tenir compte des relations entre les performances, les paramètres du régulateur et les paramètres du procédé, afin de réécrire les équations du modèle du procédé en termes de paramètres du régulateur et des performances désirées [91] [92].

Dans les schémas de commande adaptative indirecte, la commande se calcule à partir des paramètres estimés des procédés et elle s'applique simultanément au procédé et au prédicteur, on déduit que la sortie du prédicteur va se comporter en concordance avec les performances désirées quelles que soient les valeurs des paramètres estimés, on conclut donc que l'erreur de prédiction devient une mesure de l'écart entre les performances réelles et celles désirées, dans le cas où les performances désirées sont spécifiées sous la forme d'une fonction de transfert, la commande calculée va assurer l'identité entre la sortie du prédicteur et celle d'un modèle de référence explicite, ceci est illustré dans la figure 8 et de tels schémas sont appelés aussi "commande adaptative avec modèle de référence implicite".

La commande adaptative directe est une approche très attrayante en raison de sa simplicité et de l'élimination de certains problèmes numériques associés dans beaucoup de cas aux calculs de la commande à partir des paramètres estimés du procédé. Un exemple d'application de la commande adaptative directe est constitué par la commande adaptative de procédés à minimum de phase (procédé avec zéros stable).

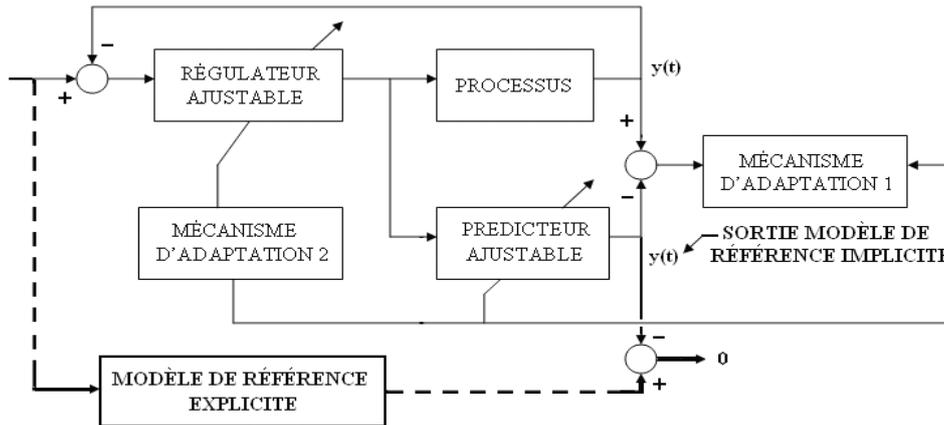


Fig.8 Commande adaptative avec modèle de référence implicite avec un prédicteur ajustable.

Pour conclure, notons que les systèmes de commande adaptative, même s'il s'agit de la commande d'un système linéaire à paramètres inconnus, sont des systèmes non-linéaires car les paramètres du régulateur dépendent des variables du procédé à travers le mécanisme d'adaptation, ceci explique les difficultés d'analyse et de synthèse de tels système [89] [90].

Les systèmes de commande adaptative contiennent deux boucles de contre-réaction :

Une interne, de type conventionnel mais ayant un régulateur ajustable et une externe agissant sur la commande à travers le changement des paramètres, de ce fait, il est tout d'abord nécessaire de bien spécifier les algorithmes de commande utilisés pour la boucle de régulation conventionnelle, ces algorithmes seront complétés par les algorithmes d'adaptation dans une étape ultérieure.

L'algorithme de commande adaptative est donc constitué des étapes suivantes:

- Étape 1 : Acquisition de la sortie du processus,
- Étape 2 : calcul de la sortie du prédicteur,
- Étape 3 : calcul de la loi de commande,
- Étape 4 : et commande de processus.

## 5. COMMANDE ADAPTATIVE AVEC MODEL DE REFERENCE

### 5.1. ALGORITHME DE LA COMMANDE ADAPTATIVE AVEC MODEL DE REFERENCE

La figure 9 représente le schéma de la commande adaptative que nous allons développer on distingue deux boucles :

- La boucle interne, qui est une boucle de contre réaction ordinaire constituant le processus et le contrôleur.

- La boucle externe, qui ajuste les paramètres du contrôleur de telle sorte que l'erreur de poursuite  $e=y-y_m$  est petite.

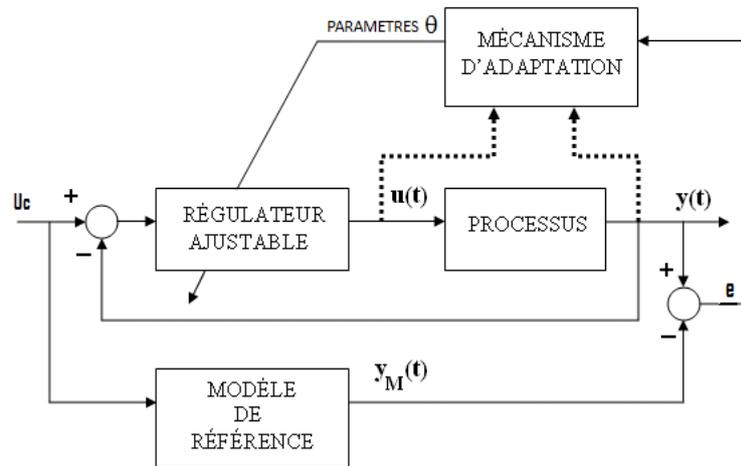


Fig. 9 Commande adaptative avec modèle de référence

Dans la commande adaptative, on cherche la fonction de Lyapunov [83] [87] et le mécanisme d'adaptation des paramètres du contrôleur afin d'assurer la convergence vers zéro de l'erreur de poursuite  $e = y - y_m$ .

On peut présenter notre système par l'équation suivante:

$$G(p) = \frac{Y(p)}{U(p)} = \frac{b}{(p+a)} \tag{VI.1}$$

La réponse désirée est donnée par le modèle de référence :

$$G_m(p) = \frac{Y_m(p)}{U_c(p)} = \frac{b_m}{(p+a_m)} \tag{VI.2}$$

On a la forme d'état du processus :

$$\frac{dy}{dt} = -ay + bu \tag{VI.3}$$

Et La forme d'état du modèle de référence s'écrit :

$$\frac{dy_m}{dt} = -a_m y_m + b_m u_c \quad \text{Sachant que : } a_m > 0 \tag{VI.4}$$

On définit la loi de commande par retour d'état:

$$u = \theta_1 u_c - \theta_2 y \quad (VI.5)$$

Le processus en boucle fermée devient :

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dt} &= -ay + bu = -ay + b(\theta_1 u_c - \theta_2 y) = \\ &= -(a + b\theta_2)y + b\theta_1 u_c = -Ay + Bu_c \end{aligned} \quad (VI.6)$$

Où:

$$A = (a + b\theta_2) \text{ et } B = b\theta_1 \quad (VI.7)$$

$$\text{L'erreur de poursuite } e = y - y_m, \text{ alors } \frac{de}{dt} = \frac{dy}{dt} - \frac{dy_m}{dt}$$

Donc :

$$\begin{aligned} \frac{de}{dt} &= (-Ay + Bu_c) - (-a_m y_m + b_m u_c) = \\ &= -a_m (y - y_m) - (A - a_m)y + (B - b_m)u_c \end{aligned} \quad (VI.8)$$

D'où

$$\frac{de}{dt} = -a_m e - (A - a_m)y + (B - b_m)u_c \quad (VI.9)$$

Premièrement si les paramètres  $a$  et  $b$  du notre système sont connus le processus suit le modèle de référence si on prend:

$$(A - a_m) = (a + b\theta_2 - a_m) = 0 \text{ et } (B - b_m) = (b\theta_1 - b_m) = 0 \quad (VI.10)$$

On calcule les paramètres idéaux (parfaits) du contrôleur

$$\theta_1 = \frac{b_m}{b} \text{ et } \theta_2 = \frac{a_m - a}{b} \quad (VI.11)$$

On aura donc,  $\frac{de}{dt} = -a_m e \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} e = 0$  (c.à.d.  $e$  tend vers 0 quand  $t$  tend vers  $\infty$ )

Si les paramètres du processus  $a$  et  $b$  sont inconnus ou varis dans le temps, alors l'erreur de poursuite  $e = y - y_m$  tend vers 0 quand  $t$  tend vers  $\infty$  si  $(A \rightarrow a_m)$  et  $(B \rightarrow b_m)$ , pour-cela on utilise un mécanisme d'adaptation des paramètres du contrôleur pour assurer la convergence vers 0 de l'erreur  $e$ , alors on applique la fonction de Lyapunov.

On définit la fonction de Lyapunov comme suit :

$$V = \frac{1}{2} \left[ e^2 + \frac{1}{\gamma b} (A - a_m)^2 + \frac{1}{\gamma b} (B - b_m)^2 \right] \quad (\text{VI.12})$$

Calculons la dérivée de la fonction de Lyapunov

$$\dot{V} = e\dot{e} + \frac{1}{\gamma b} (A - a_m)\dot{A} + \frac{1}{\gamma b} (B - b_m)\dot{B} \quad (\text{VI.13})$$

Et remplaçons  $\dot{e} = \frac{de}{dt}$

$$\begin{aligned} \dot{V} &= e[-a_m e - (A - a_m)y + (B - b_m)u_c] + \frac{1}{\gamma b} (A - a_m)\dot{A} + \frac{1}{\gamma b} (B - b_m)\dot{B} \\ &= -a_m e^2 + (A - a_m) \left[ \frac{1}{\gamma b} \dot{A} - ey \right] + (B - b_m) \left[ \frac{1}{\gamma b} \dot{B} + eu_c \right] \end{aligned} \quad (\text{VI.14})$$

Si on choisit les lois d'adaptation  $\frac{1}{\gamma b} \dot{A} - ey = 0$  et  $\frac{1}{\gamma b} \dot{B} + eu_c = 0$  ou encore

$$\dot{A} = +\gamma b e y \quad \text{et} \quad \dot{B} = -\gamma b e u_c$$

Alors

$$\dot{V} = -a_m e^2 \quad (\text{VI.15})$$

Comme  $a_m > 0$  donc  $\dot{V} \leq 0$  ce qui implique que  $e(t) \rightarrow 0$  quand  $t \rightarrow \infty$

Notons que les lois d'adaptation trouvées peuvent s'écrire sous la forme originale des paramètres du contrôleur comme suit :

$$\dot{\theta}_1 = \frac{d\theta_1}{dt} = -\gamma e u_c \Rightarrow \theta_1 = \left( \frac{-\gamma}{p} \right) e u_c \quad \text{Et} \quad \dot{\theta}_2 = \frac{d\theta_2}{dt} = \gamma e y \Rightarrow \theta_2 = \left( \frac{\gamma}{p} \right) e y \quad (\text{VI.16})$$

Sachant que les paramètres du contrôleur  $\theta_1$  et  $\theta_2$  ne convergent pas nécessairement vers leurs valeurs idéales.

## 5.2. IMPLEMENTATION DE LA COMMANDE MRAS SUR LA MADA

Après le développement du régulateur adaptatif, nous allons l'utiliser sur notre système qui a la fonction de transfert en boucle ouverte

$$G(p) = \frac{MV_s}{L_s R_r + s L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad (\text{VI.17})$$

Et le model de référence s'écris  $G_m(p) = \frac{2}{s+2}$

Nous avons simplifié la machine asynchrone double alimentation et représenté son modèle que nous avons commandé dans le chapitre IV par la commande vectorielle, maintenant nous allons essayer de commander ce modèle (Fig.3) par la commande adaptative avec modèle de référence avec une seule boucle de commande sans négliger les termes de couplage. Deux régulateurs MRAS seront utilisés : le premier pour contrôler la puissance active et le deuxième pour contrôler la puissance réactive. La figure 10 représente le système complet commandé par le MRAS.

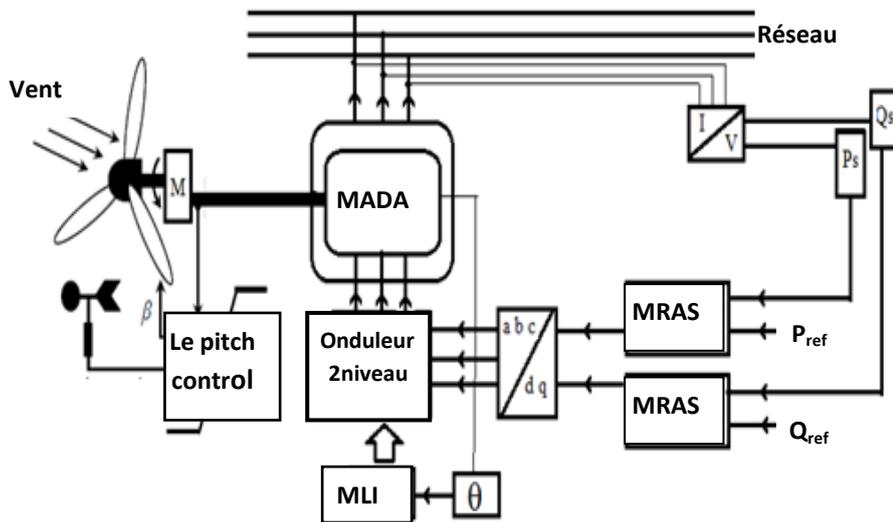


Fig.10 Commande adaptative avec modèle de référence de la MADA intégrée dans une éolienne.

### 5.3. RESULTATS DE SIMULATION

#### 5.3.1. Réponse des puissances et des courants

La simulation du système a été réalisée sous MATLAB/SIMULINK afin d'évaluer ses performances. Nous allons simuler le modèle de la GADA pilotée par la commande MRAS et alimentée par un onduleur de son côté rotorique en supposant que la vitesse du vent un gisement de la région de Adrar chapitre III, (Fig.3) afin d'analyser le découplage réalisé pour le contrôle des deux puissances active et réactive et la robustesse de cette commande.

Le premier essai consiste à réaliser des échelons de puissance active et réactive alors que la machine est entraînée, l'objectif principal de ce test est l'étude du MRAS contrôleur et la comparer avec les deux commandes vectorielle citées dans le chapitre IV en terme suivie des consignes, la qualité de la réponses et robustesse.

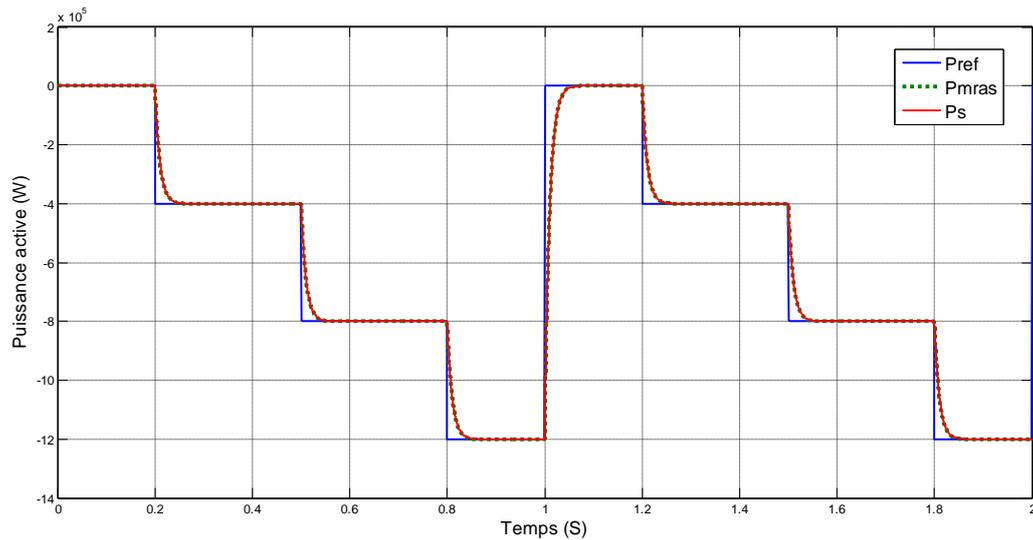


Fig.11 Réponse de la puissance active par la commande MRAS.

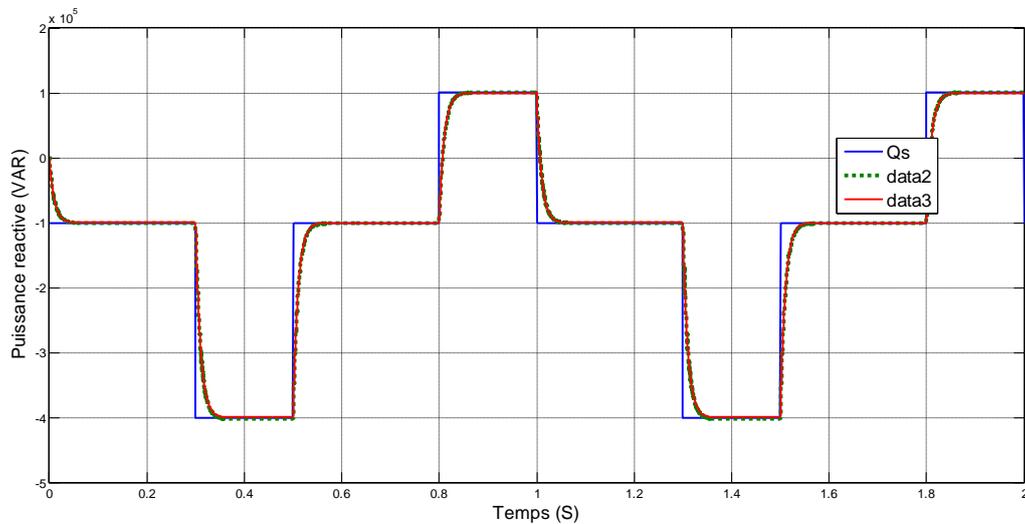


Fig.12 Réponse de la puissance réactive par la commande MRAS

Les résultats de simulation obtenus sont donnés par les figures 11 et 12, qui représentent la réponse de la commande adaptative à la consigne de la puissance active et réactive. Comme le montre ces figures, on remarque que les références sont parfaitement suivies par la machine asynchrone double alimentation et que ces réponses sont meilleures que les réponses des deux stratégies directe ou indirecte par le régulateur classique PI.

En terme de suivi des consignes et présence des perturbations la commande adaptative semble plus performante que la commande prédictive.

On peut observer l'absence de l'effet de couplage entre les deux axes de puissances puissance active et réactive.

Nous constatons aussi des résultats des courants que les composantes en quadratiques de courants rotorique (Fig.13) présentent les mêmes allures, ce qui reflète l'équation (III.68) .

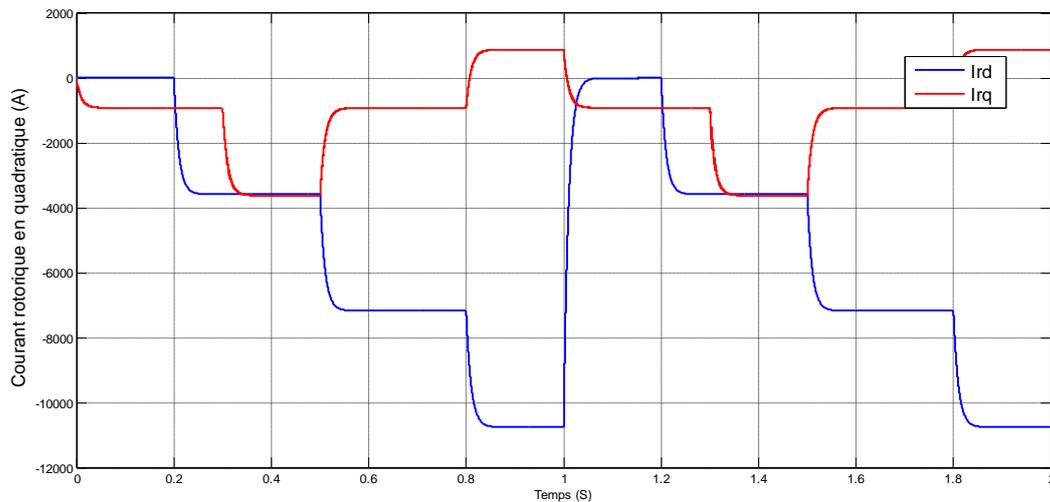


Fig.13 réponse des courant rotorique par la commande MRAS

Par ailleurs, les résultats (Fig.14) obtenus montrent que les courants statoriques de phases ont des formes presque sinusoïdales, ce qui signifie qu'une énergie de bonne qualité est fournie au réseau.

D'un autre côté, on remarque d'après la figure 14 qui illustre les spectres d'harmoniques d'une phase du courant statorique et rotorique de la GADA pour 3 cycles de fonctionnement commençant par 0.3s de 5 cycle, de la PC de contrôleurs, obtenu en utilisant la transformée de fourrier rapide (FFT) que le taux d'harmonique est égale (THD = 29%) pour les courant rotorique et (THD = 0.09%) pour les courant statorique une valeur très basse et très bonne pour être injecter au réseaux. Ces résultats nous permettent de conclure que le contrôleur MRAS nous fournis des courants statorique propre et parfaitement sinusoïdales.

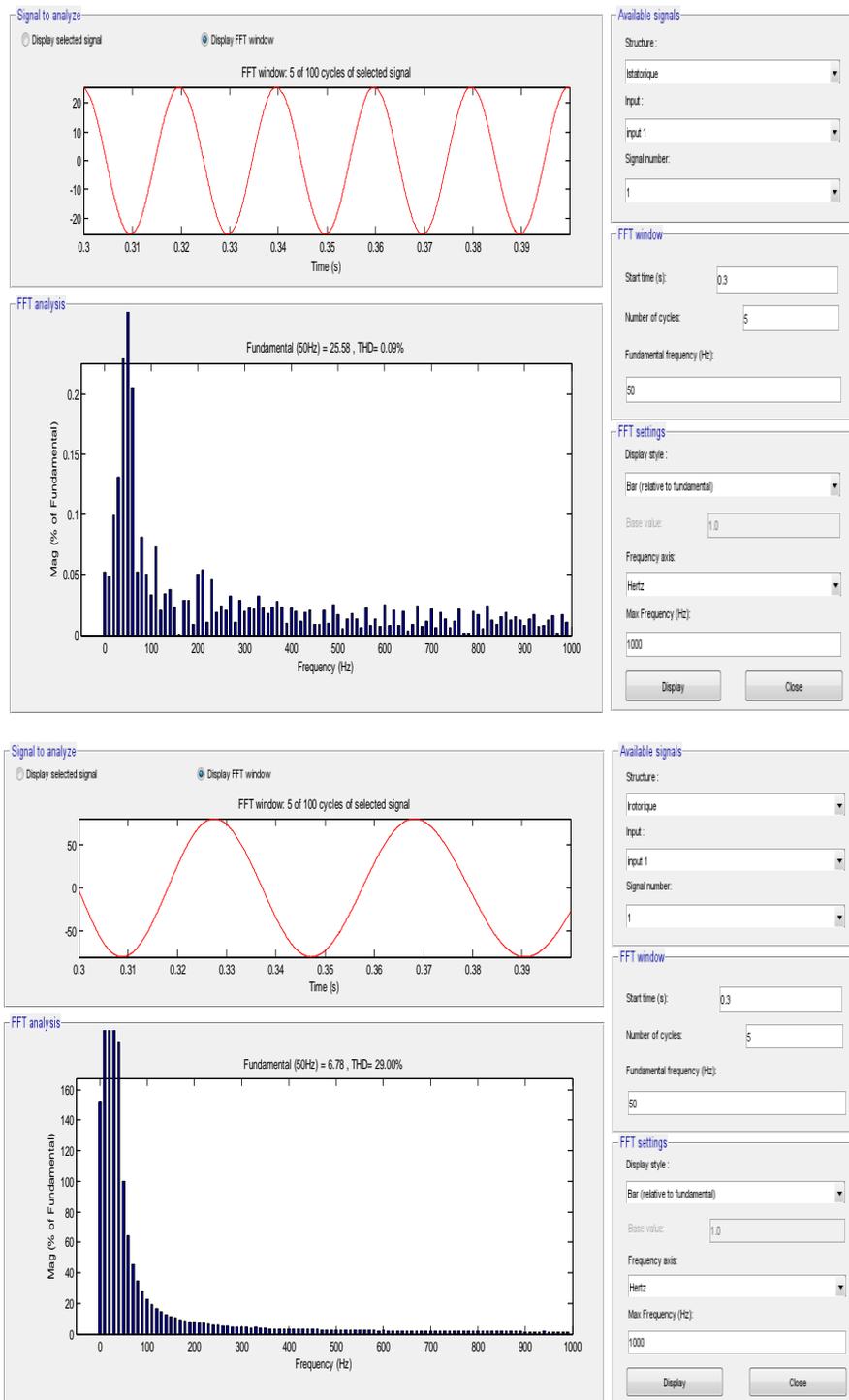


Fig.14 Spectre d'harmonique d'une phase du courant statorique et rotorique pour la MRAS

## 5.3.2. Test de robustesse

Comme dans le chapitre précédant et pour comparer la robustesse du MRAS contre la GPC et le PI, on va faire varier les paramètres de la MADA, pour évaluer cette commande contre les changements paramétriques alors. Le changement des paramètres est naturel à cause de certain phénomènes intérieurs (échauffement, variation de la charge, saturation de circuits magnétiques, forme de l'entrefer, effet pelliculaire, régime défluxé, ... etc.) ou extérieurs (perturbation, vibration, température de l'enivrement, magnétisme des autre machines, facteur de temps,....etc.)

Pour réaliser ce test de robustesse après le changement des paramètres de la MADA des deux méthodes de commande avec :

- Résistances  $R_s$  et  $R_r$  multipliées par 2 ;
- Inductances  $L_s$ ,  $L_r$  et  $M$ , divisées par 2 ;

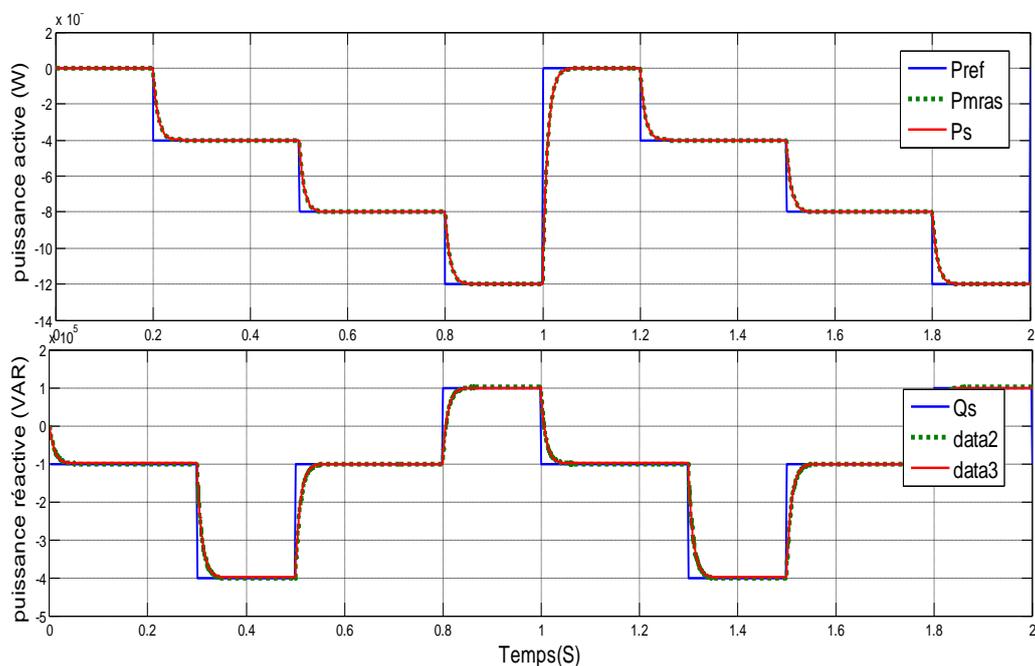


Fig.15 La commande MRAS vis-à-vis aux variations paramétriques "résistance" de la MADA.

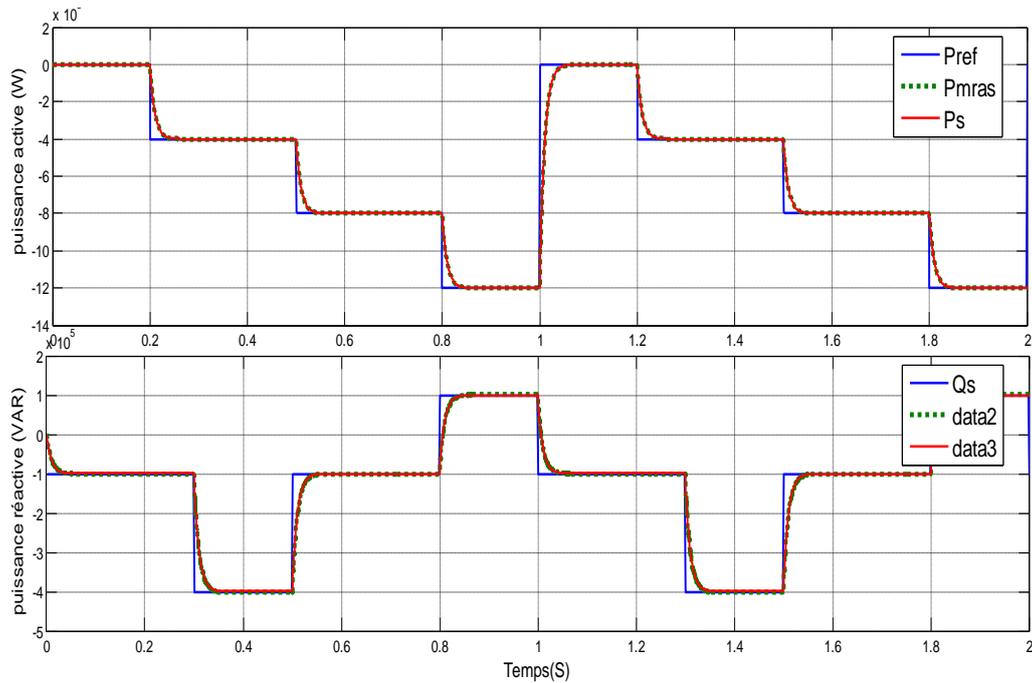


Fig.16 La commande MRAS vis-à-vis aux variations paramétriques "inductance" de la MADA.

Dans les résultats représentés dans les figures 15 et 16 notre commande MRAS a prouvé une grande robustesse contre les changements paramétrique même dans le régime transitoire ; que ce soit pour la réponse de la puissance active ou réactive les réponses ne changent plus et donne les mêmes réponses avec les paramètres initiales de la machine.

## 6. CONCLUSION

Après une introduction des différents types des commandes adaptatives on a démarré la commande adaptative avec modèle de référence pour l'appliquer sur notre système la GADA entraîné par la turbine pour l'utilisation éolienne.

Les réponses des puissances sont parfaites car elles suivent les réponses des modèle de référence et le test de robustesse a montré que la commande MRAS est très robuste.

Enfin on a appliqué le test de THD pour l'analyse spectrale des courants qui nous a montré une très bonne qualité de la forme d'onde du courant statorique avec un très faible taux de distorsion très utile pour l'intégration direct de l'énergie électrique au réseaux.

## CHAPITRE VII

# AMELIORATION DES PERFORMANCES DE COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA PAR LES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

### 1. INTRODUCTION

Nous allons essayer dans ce dernier chapitre d'améliorer la commande vectorielle directe et indirecte de la génératrice double alimentée par les réseaux de neurones pour obtenir des résultats symétrique au résultat de la commande prédictive ou adaptative avec modèle de référence en terme robustesse et qualité de courant.

Un réseau de neurones artificiels, ou réseau neuronal artificiel, est un ensemble d'algorithmes dont la conception est à l'origine très schématiquement inspirée du fonctionnement des neurones biologiques, et qui par la suite s'est rapproché des méthodes statistiques [93].

Les réseaux de neurones sont généralement optimisés par des méthodes d'apprentissage de type probabiliste, en particulier bayésien. Ils sont placés d'une part dans la famille des applications statistiques, qu'ils enrichissent avec un ensemble de paradigmes [94] permettant de créer des classifications rapides (réseaux de Kohonen en particulier), et d'autre part dans la famille des méthodes de l'intelligence artificielle auxquelles ils fournissent un mécanisme perceptif indépendant des idées propres de l'implémenteur, et fournissant des informations d'entrée au raisonnement logique formel (voir Deep Learning).

En modélisation des circuits biologiques, ils permettent de tester quelques hypothèses fonctionnelles issues de la neurophysiologie, ou encore les conséquences de ces hypothèses pour les comparer au réel.

### 2. HISTORIQUE [93] [94] [95]

Les réseaux neuronaux ont eu une histoire unique dans le domaine de la technologie. Contrairement à de nombreuses technologies aujourd'hui, que soient elles échouent directement ou sont immédiatement populaires, les réseaux de

neurones étaient populaires pour une courte durée, puis elles prirent une pause de deux décennies, puis ont été populaires depuis.

En 1943, le neurophysiologiste Warren McCulloch et le mathématicien Walter Pitts ont écrit un article sur la façon dont les neurones pourraient fonctionner afin de décrire comment les neurones dans le cerveau pourraient fonctionner, ils ont modélisé un simple réseau de neurones en utilisant des circuits électriques.

En 1949, Donald Hebb a écrit "The Organisation of Behavior", un ouvrage qui a souligné le fait que les chemins neuronaux sont renforcés chaque fois qu'ils sont utilisés, un concept fondamentalement essentiel à la façon dont les humains apprennent.

Comme les ordinateurs sont devenus plus avancés dans les années 1950, il était enfin possible de simuler un réseau de neurones hypothétiques. La première étape vers cela a été faite par Nathaniel Rochester des laboratoires de recherche d'IBM. Malheureusement pour lui, la première tentative a échoué.

En 1959, Bernard Widrow et Marcian Hoff de Stanford ont développé des modèles appelés «ADALINE» et «MADALINE». Les noms proviennent de leur utilisation de plusieurs éléments Adaptive Linéaire. ADALINE a été développé pour reconnaître les modèles binaires de sorte que si elle lisait des bits en continu à partir d'une ligne téléphonique, elle pourrait prédire le bit suivant. MADALINE a été le premier réseau neuronal appliqué à un problème du monde réel, utilisant un filtre adaptatif qui élimine les échos sur les lignes téléphoniques. Alors que le système est aussi ancien que les systèmes de contrôle de la circulation aérienne, comme les systèmes de contrôle de la circulation aérienne, il est toujours à usage commercial.

En 1962, Widrow & Hoff a développé une procédure d'apprentissage qui examine la valeur avant que le poids ne l'ajuste (c'est-à-dire 0 ou 1) selon la règle:

$$\text{Changement de poids} = (\text{Valeur de la ligne de pré} - \text{poids}) \left( \frac{\text{Erreur}}{\text{nombre d'entrées}} \right).$$

Il est basé sur l'idée que si un perceptron actif peut avoir une grosse erreur, on peut ajuster les valeurs de poids pour le distribuer à travers le réseau, ou du moins aux perceptrons adjacents. L'application de cette règle entraîne toujours une erreur si la ligne avant le poids est 0, bien que cela finisse par se corriger. Si l'erreur est conservée de sorte que tout est distribué à tous les poids que l'erreur est éliminée.

Malgré le succès ultérieur du réseau de neurones, l'architecture traditionnelle de Von Neumann a repris la scène informatique, et la recherche neurale a été laissée. Ironiquement, John Von Neumann lui-même a suggéré la l'imitation des fonctions neuronales en utilisant des relais télégraphiques ou des tubes à vide.

Dans la même période, un article a été écrit qui suggère qu'il ne pourrait pas y avoir une extension à partir du réseau de couches uniques à un réseau de couches multiples neurones. En outre, de nombreuses personnes sur le terrain utilisaient une fonction d'apprentissage qui était fondamentalement erronée parce qu'elle n'était pas différentiable sur l'ensemble de la ligne. En conséquence, la recherche et le financement ont considérablement baissé.

Cela a été couplé avec le fait que les premiers succès de certains réseaux de neurones a conduit à une exagération du potentiel des réseaux de neurones, en particulier compte tenu de la technologie pratique à l'époque. Les promesses ne s'accomplirent pas, et parfois des questions philosophiques poussèrent à la peur. Les écrivains ont réfléchi à l'effet que les soi-disant "machines pensantes" auraient sur les humains, les idées qui sont encore autour de nos jours.

L'idée d'un ordinateur qui se programme lui-même est très attrayante. Si Windows 2000 de Microsoft pouvait se reprogrammer lui-même, il pourrait être en mesure de réparer les milliers de bugs que le personnel de programmation fait. Ces idées étaient attrayantes mais très difficiles à mettre en œuvre. De plus, l'architecture Von Neumann gagne en popularité. Il y a eu quelques progrès dans le domaine, mais pour la plupart, les recherches étaient rares.

En 1972, Kohonen et Anderson ont développé un réseau similaire indépendamment l'un de l'autre, dont nous discuterons plus loin. Ils ont utilisé les mathématiques matricielles pour décrire leurs idées, mais n'ont pas réalisé que ce qu'ils faisaient était la création d'un réseau de circuits ADALINE analogiques. Les neurones sont censés activer un ensemble de sorties au lieu d'un seul.

Le premier réseau multicouche a été développé en 1975, un réseau non supervisé.

En 1982, l'intérêt pour ce domaine a été renouvelé. John Hopfield de Caltech a présenté un document à l'Académie nationale des sciences. Son approche était de créer des machines plus utiles en utilisant des lignes bidirectionnelles. Auparavant, les connexions entre les neurones n'étaient qu'une voie.

La même année, Reilly et Cooper ont utilisé un «réseau hybride» avec plusieurs couches, chaque couche utilisant une stratégie différente de résolution de problèmes.

Également en 1982, il y a eu une conférence conjointe États-Unis-Japon sur les réseaux neuronaux coopératifs / compétitifs. Le Japon a annoncé un nouvel effort de la cinquième génération sur les réseaux de neurones, et les journaux américains ont exprimé l'inquiétude que les États-Unis pourraient être laissés sur le terrain.

(Informatique de la cinquième génération implique l'intelligence artificielle. La première génération de commutateurs utilisés et de fils, la deuxième génération a utilisé le transistor, le troisième état utilisé la technologie à semi-conducteurs comme les circuits intégrés et les langages de programmation de niveau supérieur, et la quatrième génération est générateurs de code.) En conséquence, Il y avait plus de financement et donc plus de recherche sur le terrain.

En 1986, avec des réseaux de neurones multicouches dans les nouvelles, le problème était de savoir comment étendre la règle de Widrow Hoff à plusieurs couches. Trois groupes indépendants de chercheurs, parmi lesquels David Rumelhart, un ancien membre du département de psychologie de Stanford, ont proposé des idées similaires qui sont maintenant appelées réseaux de propagation de retour car elle distribue des erreurs de reconnaissance de formes dans tout le réseau. Les réseaux hybrides utilisent seulement deux couches, ces réseaux de rétro-propagation en utilisent beaucoup. Le résultat est que les réseaux de rétro-propagation sont des «apprenants lents», nécessitant peut-être des milliers d'itérations pour apprendre.

Maintenant, les réseaux de neurones sont utilisés dans plusieurs applications, dont certaines seront décrites plus loin dans notre présentation. L'idée fondamentale derrière la nature des réseaux de neurones est que si elle fonctionne dans la nature, elle doit être capable de travailler dans les ordinateurs. L'avenir des réseaux neuronaux, cependant, réside dans le développement du matériel. Tout comme les machines d'échecs avancées comme Deep Blue, les réseaux neuronaux rapides et efficaces dépendent du matériel spécifié pour son utilisation finale.

La recherche qui se concentre sur le développement de réseaux de neurones est relativement lente. En raison des limites des processeurs, les réseaux de neurones prennent des semaines pour apprendre. Certaines entreprises tentent de créer ce qu'on appelle un «compilateur de silicium» pour générer un type spécifique de circuit intégré optimisé pour l'application de réseaux de neurones. Les puces numériques, analogiques et optiques sont les différents types de puces en cours de développement. On pourrait immédiatement des signaux analogiques de rabais comme une chose du passé. Cependant, les neurones dans le cerveau fonctionnent réellement plus comme des signaux analogiques que des signaux numériques. Alors que les signaux numériques ont deux états distincts (1 ou 0, on ou off), les signaux analogiques varient entre les valeurs minimum et maximum. Peut-être un certain temps avant que les puces optiques ne puissent être utilisées dans des applications commerciales.

### 3. LES NEURONES BIOLOGIQUE

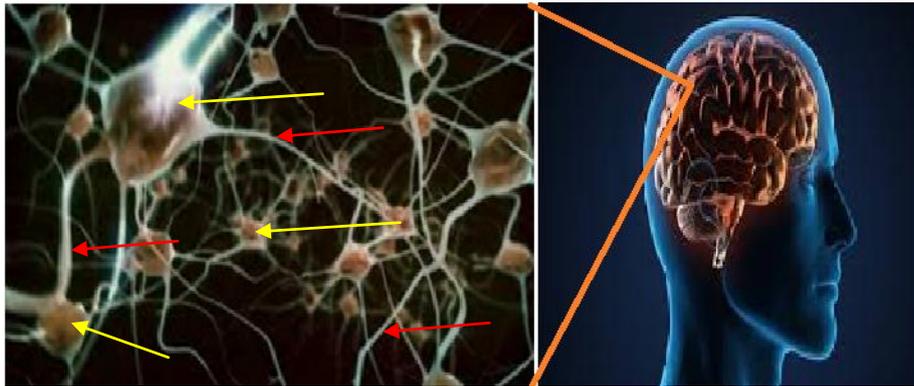


Fig.1 Le cerveau humain et le réseau de neurone biologique.

Le cerveau est principalement composé d'environ 10 milliards de neurones, chacun connecté à environ 10 000 autres neurones. Chacune des gouttes désignées par des flèches jaunes dans l'image ci-dessus sont des corps de cellules neuronales (soma), et les autres flèches rouges désignent les canaux d'entrée et de sortie (dendrites et axones) qui les relie (Fig.1) [93] [101].

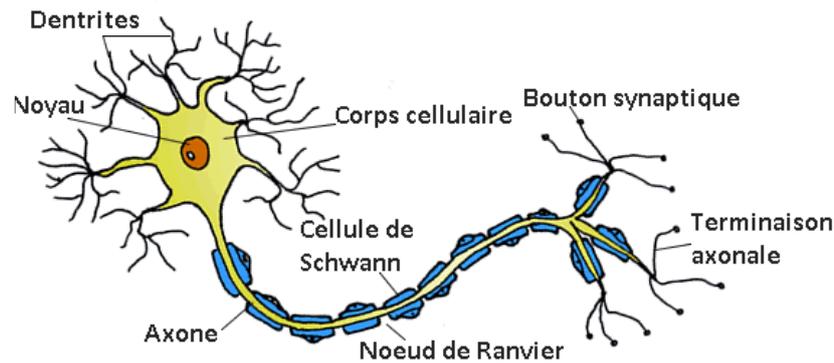
Chaque neurone reçoit des entrées électrochimiques provenant d'autres neurones des dendrites. Si la somme de ces entrées électriques est suffisamment puissante pour activer le neurone, elle transmet un signal électrochimique le long de l'axone et transmet ce signal aux autres neurones dont les dendrites sont attachées à n'importe laquelle des terminaisons axonales. Ces neurones attachés peuvent alors s'activer.

Il est important de noter qu'un neurone ne déclenche que si le signal total reçu au niveau du corps cellulaire dépasse un certain niveau. Le neurone se déclenche ou il ne le fait pas, il n'y a pas différentes qualités de déclenchement des neurones.

Ainsi, notre cerveau entier est composé de ces neurones transmetteurs électrochimiques interconnectés. A partir d'un très grand nombre d'unités de traitement extrêmement simples (chacun effectuant une somme pondérée de ses entrées, puis tirant un signal binaire si l'entrée totale dépasse un certain niveau), le cerveau parvient à exécuter des tâches extrêmement complexes.

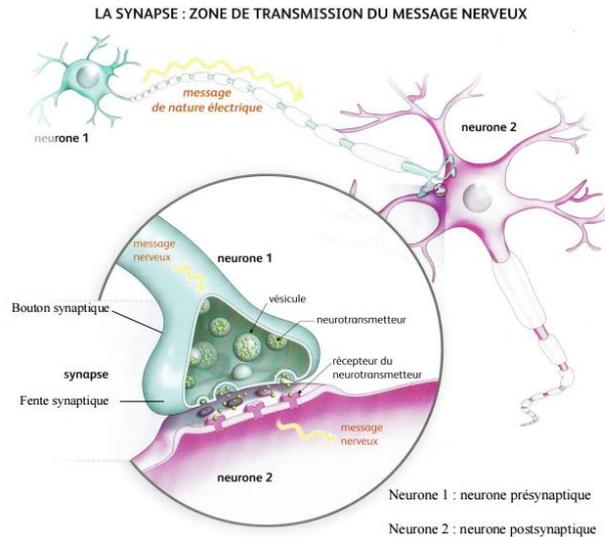
C'est le modèle sur lequel reposent les réseaux de neurones artificiels. Jusqu'à présent, les réseaux de neurones artificiels ne sont même pas venus près de modéliser la complexité du cerveau, mais ils se sont montrés bons pour des problèmes qui sont faciles pour un humain mais difficiles pour un ordinateur

traditionnel, comme la reconnaissance d'images et les prédictions basées sur connaissances passées.



*Fig.2 Modèle d'un neurone biologique.*

Dans le cerveau, le passage d'une information passe toujours par l'intermédiaire des cellules nerveuses cérébrales, les neurones. Ceux-ci possèdent des extensions sous la forme de fins filaments appelés axones qui conduisent « l'information », c'est-à-dire l'influx électrique, vers l'extérieur jusqu'à leur extrémité appelée synapse. Il existe un seul axone par neurone mais des milliers d'autres filaments amenant l'information au neurone (les dendrites) et donc des milliers de synapses « afférentes ». En revanche, c'est par les synapses (efférentes) de l'axone que le neurone « informe » son voisin (Fig.2) [93][95]. C'est en effet à cet endroit que l'extrémité du neurone est proche d'une dendrite d'un autre neurone auquel il doit faire passer l'information mais il y a un hic : l'impulsion électrique ne peut sortir de la synapse et donc du neurone sinon elle se perdrait dans l'espace interstitiel. La solution ? Lorsque l'influx nerveux arrive en bout de course, dans la synapse, il provoque la libération de substances chimiques appelées catécholamines (noradrénaline, sérotonine, GABA, etc.) qui vont aller stimuler la synapse correspondante du neurone voisin provoquant alors la naissance d'un nouvel influx nerveux identique à celui du neurone précédent : la transmission de l'information est donc passée. Bien entendu, un unique passage d'influx nerveux ne peut à lui seul représenter une information exploitable et c'est l'interaction de millions d'informations neuronales interconnectées qui explique l'activité cérébrale (Fig.3).



*Fig.3 Transmission de l'information entre les neurones biologiques*

Les synapses constituent les zones de jonction entre deux neurones ou entre un neurone et une cellule effectrice (cellule musculaire par exemple), et permettent la transmission d'une information de l'un à l'autre. Dans une synapse chimique, l'extrémité de l'axone du neurone pré-synaptique contient des vésicules (petits organites entourés d'une membrane) remplies de neuromédiateurs. L'arrivée d'un influx nerveux (potentiel d'action) provoque la migration des vésicules et leur fusion avec la membrane du neurone. Cette fusion permet la libération des molécules de neuromédiateurs dans l'espace synaptique. Ces molécules vont ensuite se fixer sur les récepteurs membranaires spécifiques de la cellule post-synaptique, ce qui déclenche chez cette dernière une réponse appropriée (nouvel influx nerveux s'il s'agit d'un neurone, contraction s'il s'agit d'une cellule musculaire, etc.). L'activité des neuromédiateurs est limitée dans le temps, notamment grâce au processus de recapture par le neurone pré-synaptique, qui stocke à nouveau les molécules dans des vésicules.

#### 4. NEURONE FORMEL

Un neurone formel est une représentation mathématique et informatique d'un neurone biologique. Le premier modèle mathématique et informatique du neurone biologique est proposé par Warren Mcculloch et Walter Pitts en 1943. En s'appuyant sur les propriétés des neurones biologiques connues à cette époque, issues d'observations neurophysiologiques et anatomiques, Mcculloch et Pitts

proposent un modèle simple de neurone formel. Il s'agit d'un neurone binaire [93] [102].

Le neurone formel possède généralement plusieurs entrées et une sortie qui correspondent respectivement aux dendrites et au cône d'émergence du neurone biologique (point de départ de l'axone). Les actions excitatrices et inhibitrices des synapses sont représentées, la plupart du temps, par des coefficients numériques (les poids synaptiques) associés aux entrées. Les valeurs numériques de ces coefficients sont ajustées dans une phase d'apprentissage. Dans sa version la plus simple, un neurone formel calcule la somme pondérée des entrées reçues, puis applique à cette valeur une fonction d'activation, généralement non linéaire. La valeur finale obtenue est la sortie du neurone.

Le neurone formel est l'unité élémentaire des réseaux de neurones artificiels dans lesquels il est associé à ses semblables pour calculer des fonctions arbitrairement complexes, utilisées pour diverses applications en intelligence artificielle.

Mathématiquement, le neurone formel est une fonction à plusieurs variables et à valeurs réelles.

Les réseaux de neurones, fabriqués de structures cellulaires artificielles, constituent une approche permettant d'aborder sous des angles nouveaux les problèmes de perception, de mémoire, d'apprentissage et de raisonnement (en d'autres termes... d'intelligence artificielle ou abrégée "I.A.") au même titre que les algorithmes génétiques. Ils s'avèrent aussi des alternatives très prometteuses pour contourner certaines des limitations des méthodes numériques classiques. Grâce à leur traitement parallèle de l'information et à leurs mécanismes inspirés des cellules nerveuses (neurones), ils infèrent des propriétés émergentes permettant de solutionner des problèmes jadis qualifiés de complexes.

Nous aborderons ici les principales architectures des réseaux de neurones. Il ne s'agit pas de les étudier toutes, car elles sont trop nombreuses, mais plutôt de comprendre les mécanismes internes fondamentaux et de savoir comment et quand les utiliser.

Le cerveau humain contient environ 100 milliards de neurones. Ces neurones nous permettent entre autre, de lire un texte tout en maintenant une respiration régulière permettant d'oxygéner notre sang, en actionnant notre coeur qui assure une circulation efficace de ce sang pour nourrir nos cellules, etc. Ils nous permettent même de comprendre certaines idées (...)

Chacun de ces neurones est par ailleurs fort complexe. Essentiellement, il s'agit de tissu vivant et de chimie. Les neurophysiciens commencent à peine à comprendre

quelques uns de leurs mécanismes internes. On croit en général que leurs différentes fonctions neuronales, y compris celle de la mémoire sont stockées au niveau des connexions (synapses) entre les neurones. C'est ce genre de théorie qui a inspiré la plupart des architectures de réseaux de neurones artificiels (dits "formels"). L'apprentissage consiste alors soit à établir de nouvelles connexions, soit à en modifier des existantes (nous nous concentrerons en particulier sur cette dernière possibilité).

Ceci nous amène à poser une question fondamentale : en ce basant sur nos connaissances actuelles, peut-on construire des modèles approximatifs de neurones et les entraîner pour, éventuellement, réaliser des tâches utiles ? Eh bien, la réponse courte est : oui !, même si les réseaux que nous allons développer ne possèdent qu'une infime fraction de la puissance du cerveau humain, et c'est l'objectif ici de montrer comment nous pouvons y arriver.

Les réseaux de neurones servent aujourd'hui à toutes sortes d'application dans divers domaines. Par exemple, nous avons développé un autopilote pour avion, ou encore un système de guidage pour automobile, nous avons conçu des systèmes de lecture automatique de chèques bancaires et d'adresses postales, nous produisons des systèmes de traitement du signal pour différentes applications militaires, un système pour la synthèse de la parole, des réseaux sont aussi utilisés pour bâtir des systèmes de vision par ordinateur, pour faire des prévisions sur les marchés monétaires, pour évaluer le risque financier ou en assurance, pour différents processus manufacturiers, pour la diagnostic médical, pour l'exploration pétrolière ou gazière, en robotique, en télécommunication, et bien d'autres. Bref, les réseaux de neurones ont aujourd'hui un impact considérable et il est probable que leur importance augmentera à l'avenir.

#### **4.1. MODELE DE NEURONE**

Le modèle mathématique d'un neurone artificiel, ou "perceptron", est illustré à la figure ci-dessous. Un neurone est essentiellement constitué d'un intégrateur qui effectue la somme pondérée de ses entrées (comme l'espérance statistique!). Le résultat  $n$  de cette somme ensuite transformée par une fonction de transfert  $f$  qui produit la sortie  $a$  du neurone [95][96].

Les  $R$  entrées du neurone correspondent au vecteur noté traditionnellement en ligne (mais au fait on prend la transposée d'où le  $T$  en suffixe) :

$$p = \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ \vdots \\ p_R \end{bmatrix} \tag{VI.1}$$

Alors que :

$$w = \begin{bmatrix} w_{11} \\ w_{21} \\ w_{31} \\ \vdots \\ w_{R1} \end{bmatrix} \tag{VI.2}$$

Représente le vecteur des poids du neurone (nous les distinguons pour préparer le terrain à des neurones un peu plus complexes). La représentation d'un neurone formel est illustrée dans la figure 4.

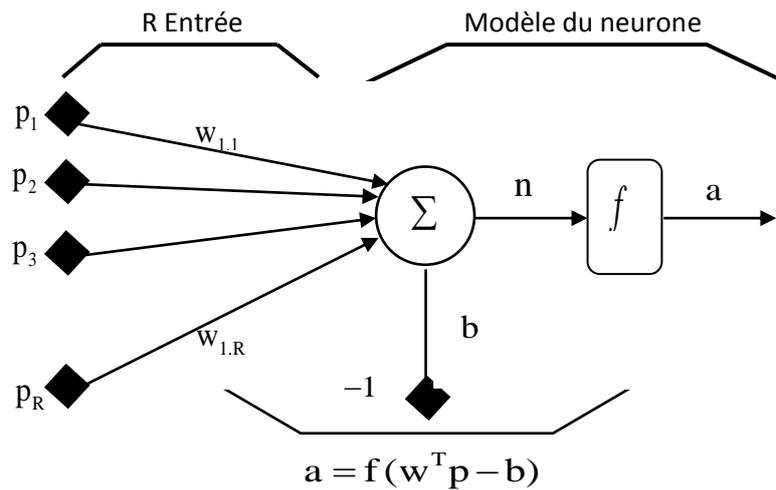


Fig.4 Représentation d'un neurone formel

La sortie n de l'intégrateur est définie (car il s'agit d'une technique de l'ingénieur) par l'équation suivante [95][96]:

$$n = \sum_{j=1}^R w_{1j} p_j - b = w_{11} p_1 + w_{12} p_2 + w_{13} p_3 + \dots + w_{1R} p_R - b \tag{VI.3}$$

Que nous pouvons aussi écrire sous forme matricielle (on pourrait aussi l'écrire sous forme tensorielle mais bon...) :  $n = w^T p - b$

Cette sorti correspond à une somme pondérée des poids et des entrées moins que ce nous nommons "le biais  $b$  du neurone" (facteur correctif décidé par tâtonnement). Le résultat  $n$  de la somme pondérée s'appelle le "niveau d'activation du neurone". Le biais  $b$  s'appelle aussi le "seuil d'activation du neurone". Lorsque le niveau d'activation atteint ou dépasse le seuil  $b$ , alors l'argument de  $f$  devient positif ou bien évidemment positif (ou nul), sinon il est négatif.

Nous pouvons faire un parallèle entre ce modèle mathématique et certaines informations que nous connaissons (ou que nous croyons connaître) à propos du neurone biologique. Ce dernier possède trois principales composantes : les dendrites, le corps cellulaire et l'axone.

Les dendrites forment un maillage de récepteurs nerveux qui permettent d'acheminer vers le corps du neurone des signaux électriques en provenance d'autres neurones. Celui-ci agit comme une espèce d'intégrateur en accumulant des charges électriques. Lorsque le neurone devient suffisamment excité (lorsque la charge accumulée dépasse un certain seuil), par un processus électrochimique, il engendre un potentiel électrique qui se propage à travers son axone pour éventuellement venir exciter d'autres neurones. Le point de contact entre l'axone d'un neurone et la dendrite d'un autre neurone s'appelle le "synapse". Il semble que c'est l'arrangement spatial des neurones et leur axone, ainsi que la qualité des connexions synaptiques individuelles qui déterminent la fonction précise d'un réseau de neurone biologique. C'est en se basant sur ces connaissances que le modèle mathématique décrit ci-dessus a été défini.

Un poids d'un neurone artificiel représente donc en quelque sorte l'efficacité d'une connexion synaptique. Un poids négatif inhibe en quelque sorte une entrée, alors qu'un poids positif vient l'accentuer. Il importe de retenir que ceci est une grossière approximation d'une véritable synapse qui résulte en fait d'un processus chimique très complexe et dépendant de nombreux facteurs extérieurs encore mal connus. Il faut bien comprendre que notre neurone artificiel est un modèle pragmatique qui, comme nous le verrons plus tard, nous permettra d'accomplir des tâches intéressantes. La vraisemblance biologique de ce modèle nous importe peu. Ce qui compte est le résultat que ce modèle nous permettra d'atteindre.

Un autre facteur limitatif dans le modèle que nous nous sommes donnés concerne son caractère discret. En effet, pour pouvoir simuler un réseau de neurones, nous allons rendre le temps discret dans nos équations. Autrement dit,

nous allons supposer que tous les neurones sont synchrones, c'est-à-dire qu'à chaque temps  $t$ , ils vont simultanément calculer leur somme pondérée et produire une sortie  $a(t) = f(n(t))$ . Dans les réseaux biologiques, tous les neurones sont en fait asynchrones.

Revenons donc à notre modèle tel que formulé par l'équation précédent et ajoutons la fonction d'activation  $f$  pour obtenir la sortie du neurone :

$$a(t) = f(w^T p - b)$$

Il est temps maintenant de remplacer (parce que la notation est un peu lourde à la longue)  $w^T$  par une matrice d'une seule ligne que nous noterons  $W = w^T$ . Nous obtenons alors une forme générale que nous adopterons tout le long de notre étude :

$$a = f(Wp - b)$$

Cette équation nous amène à introduire un nouveau schéma plus formel de notre RNF (ou perceptron) (Fig.5):

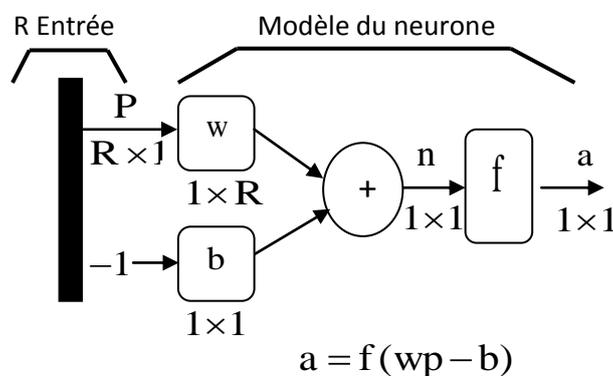


Fig.5 Représentation du nouveau neurone formel

Nous représentons les  $R$  entrées comme un rectangle noir (le nombre d'entrées est indiqué sous le rectangle). De ce rectangle sort le vecteur  $p$  dont la dimension matricielle est  $R \times 1$ . Ce vecteur est multiplié par une matrice  $W$  qui contient les poids (synaptiques) du neurone. Dans le cas d'un neurone simple, cette matrice possède la dimension  $R \times 1$ . Le résultat de la multiplication correspond au niveau d'activation qui est ensuite comparé au seuil  $b$  (un scalaire) par soustraction. Finalement, la sortie du neurone est calculée par la fonction  $f$ . La sortie d'un neurone simple est alors toujours un scalaire.

#### 4.2. FONCTIONS DE TRANSFERT

Jusqu'à présent, nous n'avons pas spécifié la nature de la fonction d'activation  $a = f(n)$  de notre modèle [97]. Il se trouve que plusieurs possibilités existent et celles-ci sont quasiment empiriques et à adapter en fonction des situations. Les plus courantes et les plus citées dans la littérature sont énumérées dans le tableau ci-dessous :

Nom de la fonction	Relation d'entrée/sortie	Icône
Seuil	$a = 0$ si $n < 0$ $a = 1$ si $n \geq 0$	
Seuil symétrique	$a = -1$ si $n < 0$ $a = 1$ si $n \geq 0$	
Linéaire	$a = n$	
Linéaire saturée	$a = 0$ si $n < 0$ $a = n$ si $0 < n \leq 1$ $a = 1$ si $n > 1$	
Linéaire saturée symétrique	$a = -1$ si $n < 0$ $a = n$ si $-1 < n \leq 1$ $a = 1$ si $n > 1$	
Linéaire positive	$a = 0$ si $n < 0$ $a = n$ si $n \geq 0$	
Sigmoïde	$a = \frac{1}{1 + \exp^{-n}}$	
Tangente hyperbolique	$a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$	
Compétitive	$a = 1$ si $n$ maximum $a = 0$ autrement	

Tab.1 Types de fonctions de transfert pour R.N.F.

Les trois fonctions les plus utilisées dans le domaine de l'ingénierie sont les fonctions "seuil" (a) (en anglais "hard limit"), "linéaire" (b) et "sigmoïde" (c) comme représentées ci-dessous dans la figure 6 :

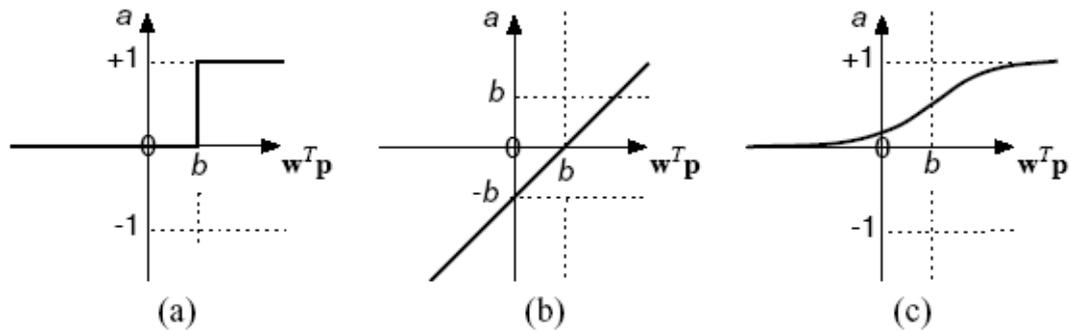


Fig.6 Les trois fonctions les plus utilisé pour R.N.F.

Comme son nom l'indique, la fonction seuil applique un seuil sur son entrée. Plus précisément, une entrée négative ne passe pas le seuil, la fonction retourne la valeur 0 (faux), alors qu'une entrée positive ou nulle dépasse le seuil, et la fonction retourne 1 (vrai). Il est évident que ce genre de fonction permet de prendre des décisions binaires (cette fonction peut aussi être assimilée à la fonction de Heaviside pour ceux qui connaissent...).

La fonction linéaire est quant à elle très simple, elle affecte directement son entrée à sa sortie selon la relation  $a = f(n) = n$ . Il est évident que la sortie du neurone correspond alors à son niveau d'activation dont le passage à zéro (l'ordonnée à l'origine) se produit lorsque  $W.p = b$ .

La fonction de transfert sigmoïde est quant à elle définie par la relation

$$\text{mathématique : } a = \frac{1}{1 + e^{-n}}$$

Elle ressemble soit à la fonction seuil, soit à la fonction linéaire, selon que nous sommes loin ou près de respectivement. La fonction seuil est très non linéaire car il y a une discontinuité lorsque  $W.p = b$ . De son côté, la fonction linéaire est tout à fait linéaire. Elle ne comporte aucun changement de pente. La sigmoïde est un compromis intéressant entre les deux précédentes. Notons finalement que la fonction "tangente hyperbolique" est une version symétrique de la sigmoïde.

#### 4.3. ARCHITECTURE DE RESEAU [98][99].

Par définition, un réseau de neurones est un maillage de plusieurs neurones, généralement organisés en couches. Pour construire une couche de S neurones, il s'agit simplement des les assembler comme à la figure ci-dessous :

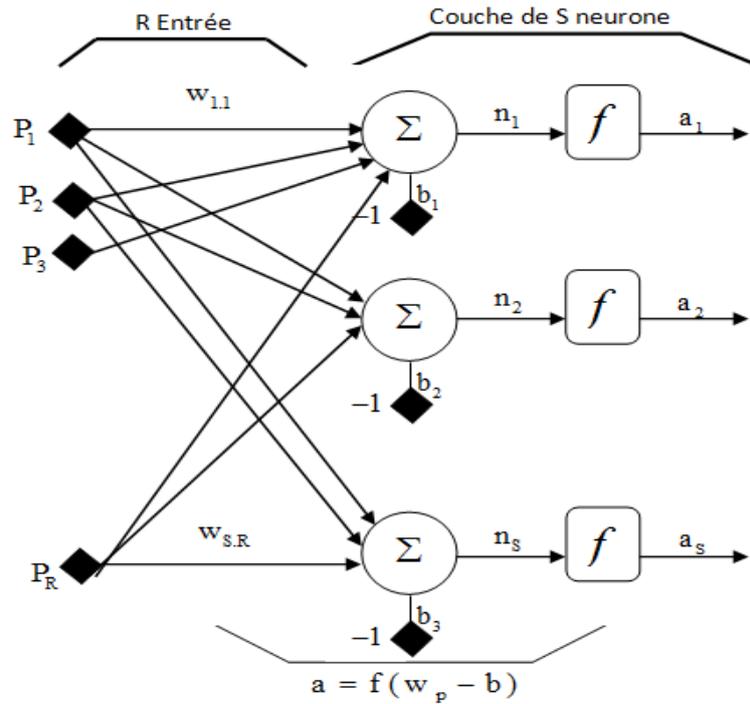


Fig.7 Architecture d'un réseau de neurone

Les  $S$  neurones d'une même couche sont tous branchés aux  $R$  entrées (Fig.7). Nous disons alors que la couche est "totalement connectée". Un poids  $w_{ij}$  est associé à chacune des connexions. Nous noterons toujours le premier indice par  $i$  et le deuxième par  $j$  (jamais l'inverse). Le premier indice (rangée) désigne toujours le numéro de neurone sur la couche, alors que le deuxième indice (colonne) spécifie le numéro de l'entrée. Ainsi,  $w_{ij}$  désigne le poids de la connexion qui relie le neurone  $i$  à l'entrée  $j$ . L'ensemble des poids d'une couche forme donc une matrice  $W$  de dimension  $S \times R$  :

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1R} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2R} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{S1} & w_{S2} & \dots & w_{SR} \end{bmatrix} \quad (VI.4)$$

Il faut bien sûr prendre en compte que nous n'avons pas nécessairement  $S = R$  dans le cas général (les nombres de neurones et d'entrées

sont indépendants). Si nous considérons que les S neurones forment un vecteur de neurones, alors nous pouvons créer les vecteurs :

$$b = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ \vdots \\ b_s \end{bmatrix}, n = \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \\ \vdots \\ n_s \end{bmatrix}, a = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ \vdots \\ a_s \end{bmatrix} \tag{VI.5}$$

Ceci nous amène à la représentation simplifiée illustrée ci-dessous (Fi.8) :

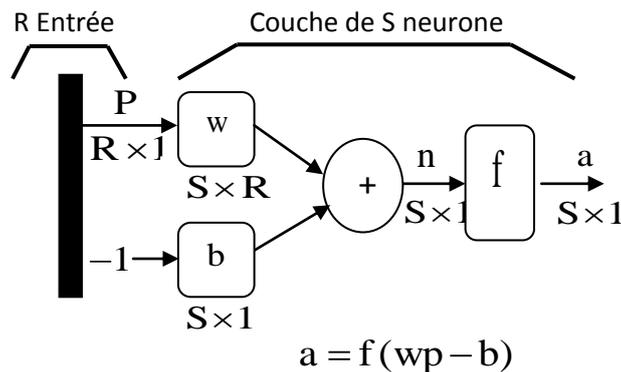


Fig.8 Simplification de l'architecture d'un réseau de neurone

Finalement, pour construire un réseau de neurones (ou PMC pour "Perceptron Multicouches"), il ne suffit plus que de combiner des couches comme ci-dessous :

Ceci nous amène à la représentation simplifiée illustrée ci-dessous (Fig9) :

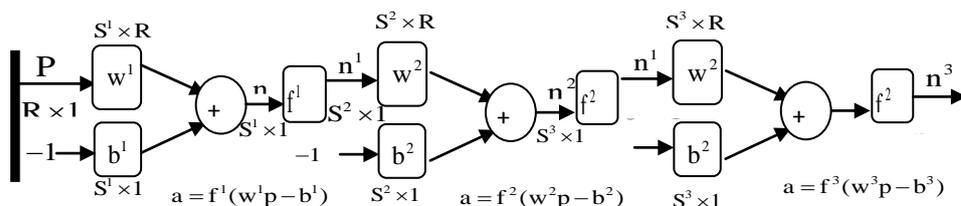


Fig.9 Architecture d'un réseau de neurone multicouche.

Cet exemple comporte R entrées et trois couches de neurones comptant respectivement  $S^1 = S^2 = S^3$  neurones. Dans le cas général, de nouveau ces nombres ne sont pas nécessairement égaux. Chaque couche possède aussi sa propre matrice

de poids  $w^k$ , où  $k$  désigne l'indice de couche. Dans le contexte des vecteurs et des matrices relatives à une couche, nous emploierons toujours un exposant pour désigner cet indice. Ainsi, les vecteurs  $b^k, n^k, a^k$  sont aussi associés à la couche  $k$ .

Il importe de remarquer dans cet exemple que les couches qui suivent la première ont comme entrée la sortie de la couche précédente. Ainsi, nous pouvons enfileur autant de couches que nous voulons, du moins en théorie. Nous pouvons fixer un nombre quelconque de neurones sur chaque couche. En pratique, nous verrons plus tard qu'il n'est cependant pas souhaitable d'utiliser trop de neurones. Notons aussi que rien ne nous empêche de changer de fonction de transfert d'une couche à l'autre. Ainsi, dans le cas général nous n'avons pas nécessairement  $f^1 = f^2 = f^3$ .

**NOTE:** La dernière couche est nommée "couche de sortie". Les couches qui précèdent la couche de sortie sont nommées "couches cachées".

**NOTE:** Les réseaux multicouches sont beaucoup plus puissants que les réseaux simples à une seule couche bien évidemment. En utilisant deux couches, à condition d'employer une fonction d'activation sigmoïde sur la couche cachée, nous pouvons "entraîner" un réseau à produire une approximation de la plupart des fonctions, avec une précision arbitraire. Sauf dans de rares cas, les réseaux de neurones formels exploitent deux ou trois couches.

**NOTE:** "Entraîner" un réseau de neurones signifie modifier la valeur de ses poids et de ses biais pour qu'il réalise la fonction d'entrée sortie (I/O). Nous étudierons en détails différents algorithmes et méthodes d'approche heuristiques pour y parvenir dans différents contextes.

#### 4.4. APPRENTISSAGE

La notion d'apprentissage, bien que connue déjà depuis Sumer, n'est pas modélisable dans le cadre de la logique déductive : celle-ci en effet procède à partir de connaissances déjà établies dont on tire des connaissances dérivées. Or il s'agit ici de la démarche inverse : par observations limitées, tirer des généralisations plausibles : c'est un procédé par induction [97] [100].

La notion d'apprentissage recouvre deux réalités souvent traitées de façon successive :

- mémorisation : le fait d'assimiler sous une forme dense des exemples éventuellement nombreux,
- généralisation : le fait d'être capable, grâce aux exemples appris, de traiter des exemples distincts, encore non rencontrés, mais similaires.

Dans le cas des systèmes d'apprentissage statistique, utilisés pour optimiser les modèles statistiques classiques, réseaux de neurones et automates markoviens, c'est la généralisation qui est l'objet de toute l'attention.

Cette notion de généralisation est traitée de façon plus ou moins complète par plusieurs approches théoriques.

- La généralisation est traitée de façon globale et générique par la théorie de la régularisation statistique introduite par Vladimir Vapnik. Cette théorie, développée à l'origine en Union soviétique, s'est diffusée en Occident depuis la chute du mur de Berlin. La théorie de la régularisation statistique s'est diffusée très largement parmi ceux qui étudient les réseaux de neurones en raison de la forme générique des courbes d'erreurs résiduelles d'apprentissage et de généralisation issues des procédures d'apprentissage itératives telles que les descentes de gradient utilisées pour l'optimisation des perceptrons multi-couches. Ces formes génériques correspondent aux formes prévues par la théorie de la régularisation statistique ; cela vient du fait que les procédures d'apprentissage par descente de gradient, partant d'une configuration initiale des poids synaptiques explorent progressivement l'espace des poids synaptiques possibles ; on retrouve alors la problématique de l'augmentation progressive de la capacité d'apprentissage, concept fondamental au cœur de la théorie de la régularisation statistique.
- La généralisation est aussi au cœur de l'approche de l'inférence bayésienne, enseignée depuis plus longtemps. Le théorème de Cox-Jaynes fournit ainsi une base importante à un tel apprentissage, en nous apprenant que toute méthode d'apprentissage est soit isomorphe aux probabilités munies de la relation de Bayes, soit incohérente. C'est là un résultat extrêmement fort, et c'est pourquoi les méthodes bayésiennes sont largement utilisées dans le domaine.

#### 4.5. EXEMPLE DE CALCUL

On va essayer de développer et entraîner un réseau de neurones pour calculer une fonction XOR

Le choix de la fonction d'activation est très important alors on a choisie le SIGMOÏDE parce qu'elle est dérivable contrairement à la fonction STEP.

On connaît que les vecteurs d'entrée et de sortie pour la fonction logique XOR

sont :  $P = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$   $t = [0 \ 1 \ 1 \ 0]$ . La figure 10 représente l'explication de la connexion

entre deux neurones.

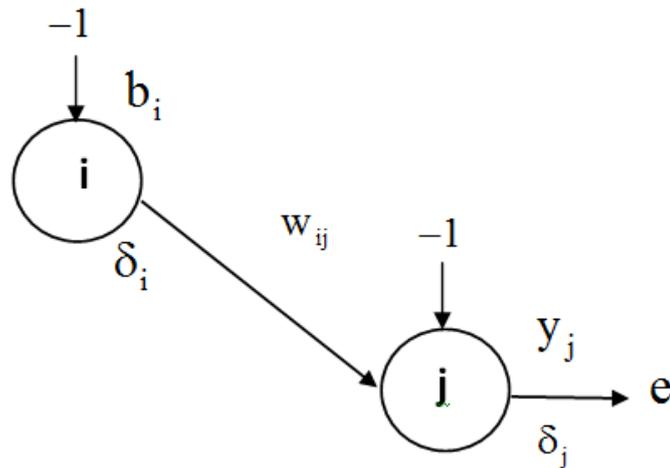


Fig.10 Explication de la connexion entre deux neurones.

Sachant que  $Y = \text{sigmoide}(x) = \frac{1}{1 + e^x}$  et la dérivée de sig  
 $\text{Der}(\text{sigmoide}(x)) = \text{Der}(Y) = Y(1 - Y)$ ,  $\delta_j = (e) \text{Dersig}(y_j)$ ,  $\delta_i = \delta_j w_{ij} \text{Dersig}(y_i)$ ,  
 $\Delta w_{ij} = \alpha y_i \delta_j$

Alors que le choix du réseau de neurone 2 entrés et une sortie, pour la couche cachée on va utilisée 2 neurones (Fig.11).

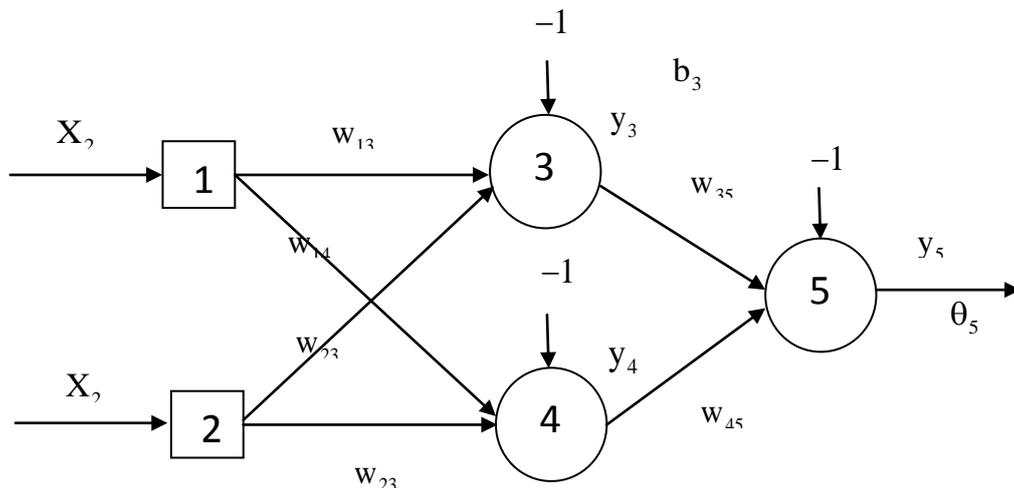


Fig.11 Réseau de neurone 2-2-1.

Après chaque Itération ("quatre itération dans chaque époque de calcul") on va essayer de corriger tout les points et les bais (" $b_3, b_4, b_5, w_{13}, w_{14}, w_{23}, w_{24},$

$w_{35}, w_{45}$ ”) par le calcul des ( $\Delta b_3, \Delta b_4, \Delta b_5, \Delta w_{13}, \Delta w_{14}, \Delta w_{23}, \Delta w_{24}, \Delta w_{35}, \Delta w_{45}$ ”) après le calcul du gradient d'erreur

On va démarrer avec des valeurs initiales des points et des biais aléatoires.

$b_3 = 0.8, b_4 = -0.1, b_5 = 0.3, w_{13} = 0.5, w_{14} = 0.9, w_{23} = 0.4, w_{24} = 1, w_{35} = -1.2, w_{45} = 1.1, \alpha = 0.1$

On démarre l'entraînement pour 1 itération ( $x_1 = 1, x_2 = 1, y = 0$ ):

$$\left\{ \begin{array}{l} y_3 = \text{sigmoid}(x_1 w_{13} + x_2 w_{23} - b_3) = \text{sigmoid}(0.5 + 0.4 - 0.8) \\ \quad = \text{sigmoid}(0.1) = \frac{1}{1 + e^{-0.1}} = 0.525 \\ y_4 = \text{sigmoid}(x_1 w_{14} + x_2 w_{24} - b_4) = \text{sigmoid}(0.9 + 1 - 0.1) \\ \quad = \text{sigmoid}(2) = \frac{1}{1 + e^{-2}} = 0.8808 \\ y_5 = \text{sigmoid}(y_3 w_{35} + y_4 w_{45} - b_5) = 0.5097 \end{array} \right. \quad (\text{VI.6})$$

#### 4.5.1. Calcul de l'erreur et de l'erreur gradient

On trouve pour l'erreur et l'erreur gradient :

$$e = y_{\text{désiré}} - y_{\text{réel}} = 0 - 0.5097 = -0.5097$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_5 = (e) \text{dersig}(y_5) = (e) y_5 (1 - y_5) = (-0.5097)(0.5097)(1 - 0.5097) = -0.1274 \\ \delta_3 = w_{35} \delta_5 \text{dersig}(y_3) = (-1.2)(-0.1274)(0.525)(1 - 0.525) = 0.0381 \\ \delta_4 = w_{45} \delta_5 \text{dersig}(y_4) = (1.1)(-0.1274)(0.8808)(1 - 0.8808) = -0.0147 \end{array} \right. \quad (\text{VI.7})$$

#### 4.5.2. L'ajustement des points et des biais

Après le calcul des erreurs on peut maintenant calculer les nouveaux points et biais puis on refait l'entraînement jusqu'à ce qu'on trouve une erreur proche ou égale à zéro.

$$\begin{cases}
 \Delta w_{35} = \alpha y_3 \delta_5 = (0.1)(0.525)(-0.1274) = -0.0067 \\
 \Delta w_{45} = \alpha y_4 \delta_5 = (0.1)(0.8808)(-0.1274) = -0.0112 \\
 \Delta \theta_5 = \alpha (-1) \delta_5 = (0.1)(-1)(-0.1274) = -0.0127 \\
 \Delta w_{13} = \alpha x_1 \delta_3 = (0.1)(1)(0.0381) = 0.00381 \\
 \Delta w_{23} = \alpha x_2 \delta_3 = (0.1)(1)(0.0381) = 0.00381 \\
 \Delta w_{14} = \alpha x_1 \delta_4 = (0.1)(1)(-0.0147) = -0.0015 \\
 \Delta w_{24} = \alpha x_2 \delta_4 = (0.1)(1)(-0.0147) = -0.0015 \\
 \Delta b_3 = \alpha (-1) \delta_3 = (0.1)(-1)(0.0381) = -0.00381 \\
 \Delta b_4 = \alpha (-1) \delta_4 = (0.1)(-1)(0.0147) = -0.0015
 \end{cases} \quad (VI.8)$$

$$\begin{cases}
 w_{ij} \leftarrow w_{ij} + \Delta w_{ij} \\
 w_{13} = w_{13} + \Delta w_{13} = 0.5 + 0.00381 \\
 w_{14} = w_{14} + \Delta w_{14} = 0.9 - 0.0015 = 0.8985
 \end{cases} \quad (VI.9)$$

## 5. AMELIORATION DES PERFORMANCES DE COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA PAR LES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS

Nous allons essayer d'améliorer les performances la commande par le régulateur PI par les réseaux de neurones pour mieux exploiter cette commande, avoir des bonnes réponses en gardant une robustesse satisfaisante, après plusieurs essais effectués sur les différentes structures, nous avons choisi une architecture de réseau de neurones multicouches, une couche d'entrée contenant 1 neurone, une seule couche cachée contenant 10 neurones et une couche de sortie contenant 1, en utilisant la fonctions d'activations : 'logsig'.

### 5.1. RESULTATS DE SIMULATION

#### 5.1.1. Réponse des puissances

La simulation du système a été réalisée sous MATLAB/SIMULINK afin d'évaluer les performances de notre commande. Nous allons simuler le modèle de la GADA pilotée par la commande par réseaux de neurones et alimentée par un onduleur de son côté rotorique en supposant que la vitesse du vent a un gisement de la région de Adrar représenté dans le chapitre III, dans la figure 3 afin d'analyser le découplage réalisé pour le contrôle des deux puissances active et réactive et la robustesse de cette commande.

Le premier essai consiste à réaliser des échelons de puissance active et réactive alors que la machine est entraînée, l'objet principal est de remplacer les régulateurs PI par les RNA et de comparer les résultats avec les deux commandes vectorielles citées dans le chapitre 3 en terme de suivi des consignes, la qualité de la réponse et la robustesse.

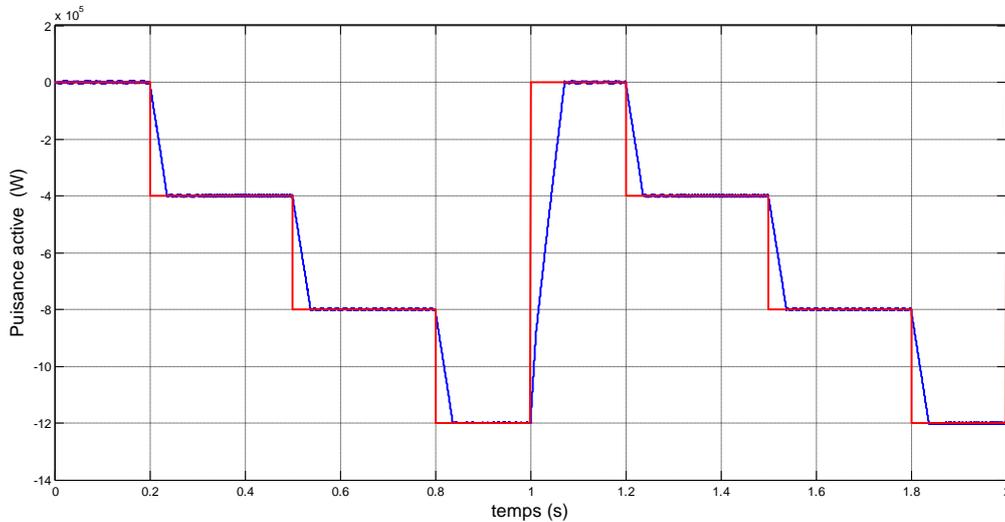


Fig.12 Réponse de la puissance active par la commande RNA

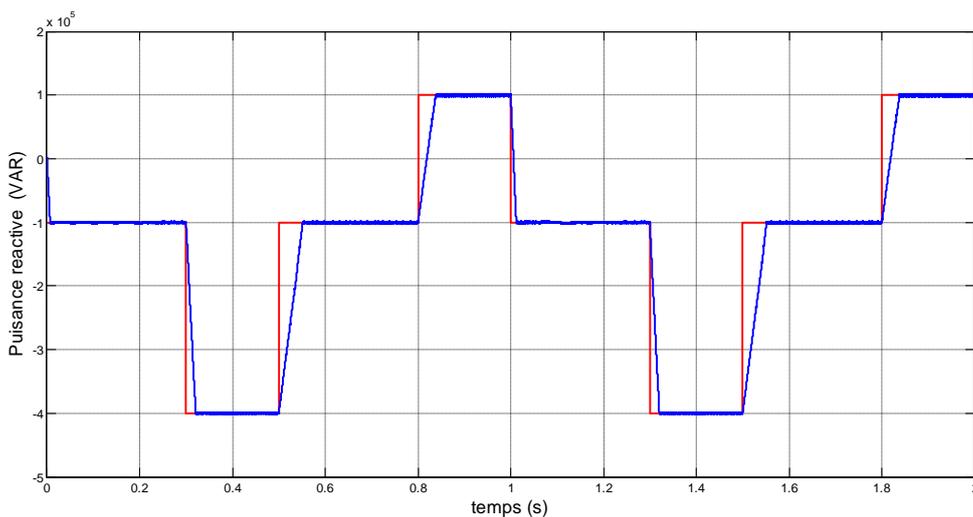


Fig.13 Réponse de la puissance réactive par la commande RNA

Les résultats de simulation obtenus sont montrés dans les figures 12 et 13. Elles représentent les réponses de la commande RNA à la consigne de la puissance active et réactive. On remarque que les références sont parfaitement suivies par la machine asynchrone double alimentation. Les réponses sont meilleures que celles

des deux stratégies directe ou indirecte régulé classiquement (régulateurs PI) en terme suivie des consignes et même les perturbations et les oscillations sont négligeables par rapport au régulateur PI.

On peut remarquer l'absence de l'effet du couplage entre les deux axe de puissances puissance active et réactive parce que même après le changement brusque d'une puissance sa n'infecte pas la deuxième.

### 5.1.2. Test de robustesse

Ce test consiste à faire varier les paramètres de la MADA pour tester la robustesse de la RNA et pour s'approcher à l'environnement et au mode d'exploitation de la machine.

Pour réaliser ce test de robustesse de la MADA pour deux modes de commande (commande directe et indirecte) avec un changement des paramètres effectué :

- Résistances  $R_s$  et  $R_r$  multipliées par 2.
- Inductances  $L_s$ ,  $L_r$  et  $M$ , divisées par 2.

Les figures 14 et 15 représentent la commande vectorielle améliorée par les réseaux de neurones vis-à-vis des variations paramétriques de la MADA (changement de la résistance et l'inductance).

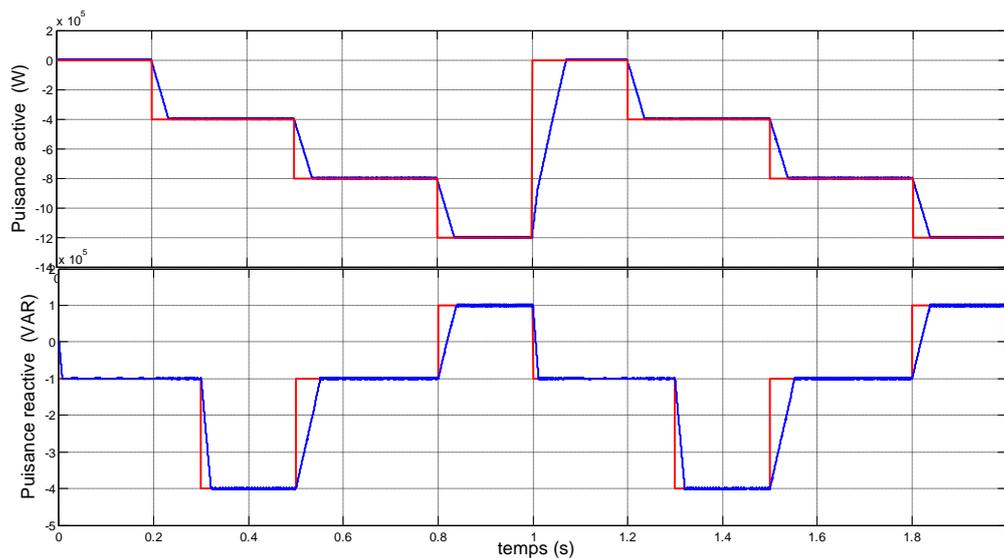


Fig.14 La commande RNA vis-à-vis aux variations paramétriques "résistance" de la MADA.

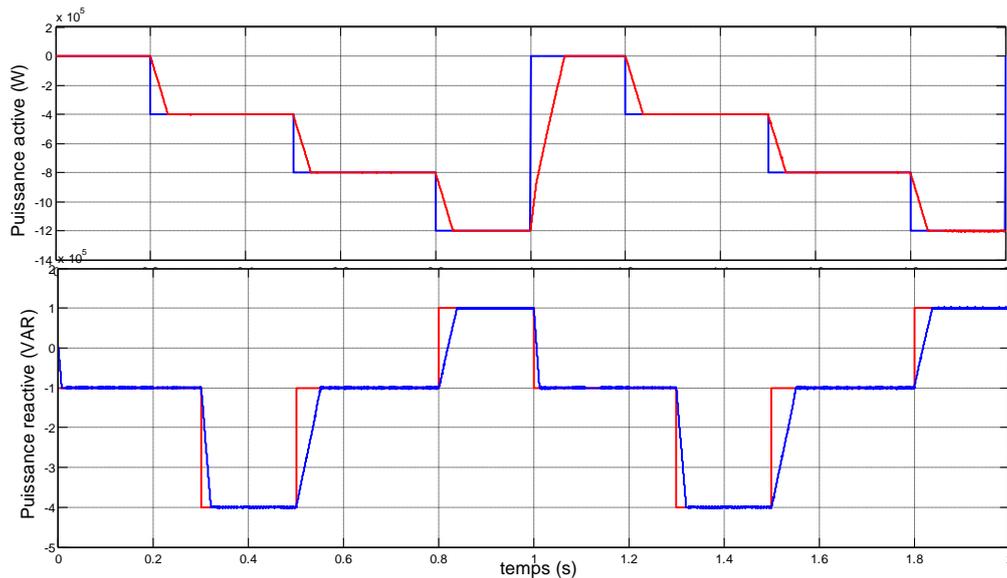


Fig.15 La commande RNA vis-à-vis aux variations paramétriques "inductance" de la MADA.

Dans les résultats représentés dans les figures 14 et 15, le test montre la robustesse de la commande RNA vis à vis des changements paramétriques même dans le régime transitoire.

La réponse de la puissance active ou réactive ne changent pas et s'engendre que des perturbations presque négligeable alors la commande vectorielle direct et indirect ont montré une grande sensibilité ce test.

D'un autre côté, on remarque d'après la figure 12 qui illustre les spectres d'harmoniques d'une phase du courant statorique et rotorique de la GADA pour 3 cycles de fonctionnement commençant par 0.3s de 5 cycle, de la PC de contrôleurs, obtenu en utilisant la transformée de fourrier rapide (FFT) que le taux d'harmonique (THD) est réduit (THD = 3.08%) pour les courant rotorique et (THD = 4.28%) pour les courant statorique. Ces résultats nous permettent de conclure que le contrôleur RNA a améliorer la qualité du courant.

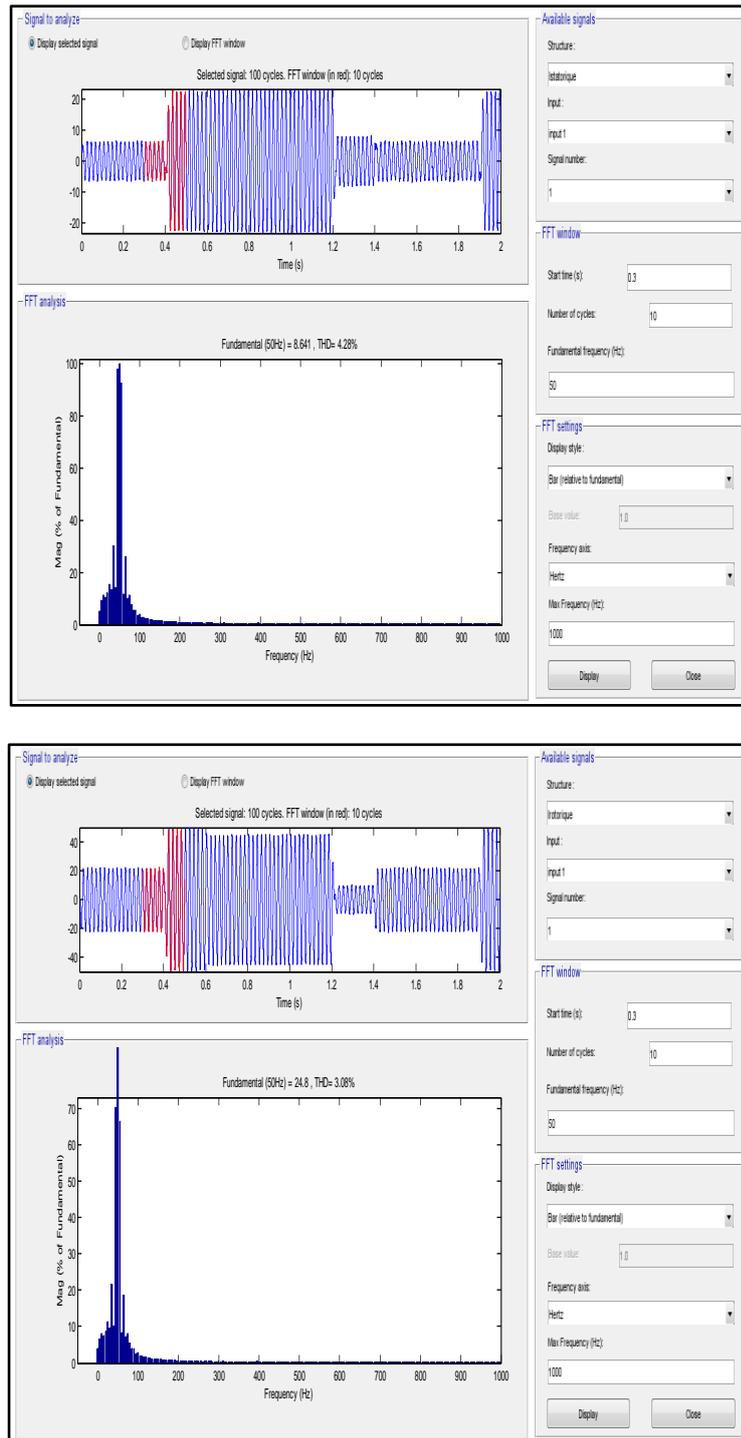


Fig.16 Spectre d'harmonique d'une phase du courant statorique et rotorique commande indirecte ameliorer par RNA

## 6. CONCLUSION

Après l'utilisation de la commande par régulation PI vectorielle nous avons utilisé la commande par réseaux de neurone pour améliorer et renforcer cette commande, nous avons vue le mode de fonctionnement des réseaux de neurone naturelle puis

artificielle, après on a vu les différents types des architecture des réseaux de neurones puis utiliser les l'architectures à multicouches pour contrôler notre machine.

L'étude des performances de cette commande par simulation MATLAB a montré des résultats satisfaisants pour la poursuite des échelons des puissances et le test de robustesse contre les variations paramétriques de la machine.

### CONCLUSION GENERALE

On a présenté dans notre thèse l'étude, la modélisation et la simulation d'un système de conversion éolien à vitesse variable à base de machine asynchrone double alimentation connectée au réseau et commandée par différentes modes de contrôles.

Notre travail consiste à utiliser notre système éolien décomposé en deux parties une est la partie mécanique "la turbine" et deuxième est la partie électrique "l'onduleur et la MADA" d'une façon optimale, On a utilisé une stratégie de maximiser la puissance extraite du vent pour avoir une vitesse optimale au niveau de l'arbre de la turbine qui entraîne notre génératrice, ensuite on a commandé la génératrice en utilisant quatre modes de contrôles en faisant une étude comparative entre ces modes de commande.

On a pu voir dans le premier chapitre, après la présentation des différentes sources d'énergies renouvelables existantes et les potentiels algériens de chaque énergie que les ressources de l'énergie solaire sont très importantes au niveau de notre pays et l'énergie éolienne vient en second position, cette dernière présente l'étude de notre thèse.

Le choix de notre système et bien expliqué dans le deuxième chapitre, l'éolienne à axe vertical à vitesse variable utilisant la machine asynchrone à double alimentation semble le meilleur système de production avec plusieurs avantages du au choix de la turbine et au choix de la génératrice.

Après l'utilisation de L'MPPT sans et avec asservissement dans le troisième chapitre on a pu conclure que l'utilisation de cette technique est satisfaisante avec des bonnes performances statiques et dynamiques mais l'MPPT sans asservissement la dynamique du système en boucle fermée ne compense pas la dynamique du système mécanique et le MPPT avec asservissement dépend de la mesure instantanée du la vitesse du vent ce qui induit une dégradation de la puissance aérodynamique si la mesure du vent est fausse ou pas précise.

Dans le quatrième chapitre on a utilisé après la modélisation de la partie électrique dans le chapitre précédant on a appliqué la commande vectorielle sur le modèle simplifié de la machine asynchrone double alimentation ce qui nous a permis de contrôler séparément la puissance active et réactive produite par la MADA intégré au réseau. Mais malgré les réponses satisfaisantes des deux méthodes de cette commande direct et indirecte en terme de suivie des consignes, elles montrent une grande sensibilité contre les changements paramétriques.

## CONCLUSION GENERALE

---

Le cinquième et le sixième chapitres montrent une grande efficacité des commandes à intelligence artificielle comme la commande prédictive et adaptative à modèle de référence. On a remplacé le régulateur classique PI utilisé dans le chapitre 4 par ces deux régulateurs GPC et MRAS. Les résultats de simulations obtenus par ces deux commandes montrent de bonnes performances traduites par une excellente réponse des puissances en thème suivie de consigne et découplage entre les deux formes de puissance, même la robustesse de ces commandes est remarquable par rapport à la de la commande classique contre les variations paramétriques. Enfin l'application du test de THD pour l'analyse spectrale des courants nous a montré une très bonne qualité de la forme d'onde du courant rotorique et statorique avec de très faible taux de distorsion pour les deux commandes.

Le dernier chapitre présente la commande par réseau de neurone pour remplacer le régulateur PI en gardant les performances de cette commande et améliorer la robustesse et la qualité des courants traduit par les résultats de simulation.

Après ce travail plusieurs perspectives intéressantes sont envisageables :

- Une validation sur une plate forme expérimentale " implémentation en dSPACE " afin de confirmer les résultats de simulation des différentes méthodes de commandes appliquées.
- Amélioration du système de conversion par l'hybridation avec l'énergie solaire.
- Amélioration des deux commandes prédictive et adaptative par les réseaux de neurones système de conversion par l'hybridation avec l'énergie solaire.

**Abstract**

The parameters variations of models systems oblige us to find and develop a robust control in contrast the classic controller (PID) because It does not satisfy the models performances, for that we must choose a mode of control that has the best response even if the system is non linear or parameters are changing

In this thesis we recall generalized predictive control (GPC) and adaptive control with reference model (MRAC) because of the large industrial use of those modes of controls for a doubly fed induction generation (DFIG) connected directly to the grid by its stator and controlled by its rotor by two level converter used for wind turbine. Then we use neural network (RN) to develop the classical controller to have the same performance of predictive and adaptive control with reference model. Results by Matlab/Simulink shows very good responses in terms of reference tracking, robustness and Current harmonics distortion.

**Résumé**

La variation des paramètres des systèmes nous oblige à trouver et développer un système de contrôle robuste au contraire du contrôleur classique (PID) car il n'est pas satisfaisant, alors il faut choisir un mode de contrôle qui possède les meilleures réponses de notre système même s'il n'est pas linéaire où les paramètres varient en grande proportion. Dans cette thèse, nous utilisons la commande prédictive généralisée (GPC) et la commande adaptative avec le modèle de référence (MRAC) à cause de la grande utilisation industrielle de ces deux modes de contrôle pour contrôler une machine asynchrone double alimentée (MADA) reliée directement au réseau par son stator et commander par son rotor par un onduleur deux niveau utilisé pour une éolienne. Ensuite, nous utilisons les réseaux de neurones (RN) pour développer le contrôleur classique pour avoir les mêmes performances du GPC et MRAC. Les résultats de Matlab / Simulink en termes de suivie de référence, de robustesse et de distorsion des harmoniques de courant sont très bons pour les trois modes de contrôle.

**ملخص**

إن تغيير معالم الأنظمة يجبرنا على إيجاد وتطوير نظام تحكم قوي بخلاف جهاز التحكم الكلاسيكي لأنه غير مرضي إذن يجب علينا اختيار طريقة تحكم التي تضمن أفضل الإجابات لنظامنا حتى لو أنها ليست خطية أو المعالم تختلف بنسبة كبيرة. في هذه الأطروحة، سوف نستعمل نظام التحكم التنبؤي ونظام المهابئة بواسطة النموذج المرجعي بسبب الإستخدام الصناعي الكبير لهاتين الطريقتين للتحكم في مولدة لا التزامية مزدوجة التغذية ترتبط مباشرة بعنصرها الساكن إلى الشبكة الكهربائية ومغذاة من جهة الدوار بواسطة موج ذي مستويين ثم نستخدم التحكم بالشبكات العصبية لتطوير جهاز التحكم الكلاسيكي للحصول على نفس أداء نظام التحكم التنبؤي ونظام المهابئة بواسطة النموذج المرجعي النتائج المحصل عليها بواسطة (ماتلاب/ سيمولينك) مرضية وجيدة جدا من ناحية إتباع المرجع المتانة ونوعية الكهرباء المولدة