

11/621.775

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



Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Automatique et Informatique Industrielle
Spécialité : Commande et Diagnostic
des Systèmes Industriels

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

Sur la commande des systèmes d'énergie renouvelables

Présenté par :
Kaboub Abderrahmane

Sous la direction de :
DR. A Mousaoui



JUIN 2012

REMERCIEMENT

Remerciement



*Mes remerciements vont tout premièrement, au **ALLAH** le tout puissant qui m'a donné la foi, le courage et la patience de parvenir à finir ce modeste travail.*

Le présent travail a été réalisé au sein du Laboratoire de Génie Electrique de Guelma « LGEG » de l'Université de Guelma.

*J'adresse tous mes respects et remerciements à monsieur le **DR.A.MOUSSAOUI**, pour ses nombreux conseils et son soutien et son encadrement en haut qualité tout au long de ce travail.*

Je remercie tous les membres de laboratoire qui m'ont envoyé leurs sourires durant ma présence au sein de laboratoire.

*Je remercie monsieur **BENKHDIR** et **MATALAH** pour leur geste qui m'a encouragé et aidé pour terminer ce travail*

Dédicaces

A ma chère mère, pour son soutien inconditionnel, ses encouragements, et bien sûr pour ses prières pour nous voire réaliser nos rêves et nos vœux;

A mon cher père, qui m'a encouragé chaque jours et qu'il n'a laissé aucun manque dans ma vie et il ne l'a rempli pas ;

A mes frères et mes sœurs

A toute ma famille

A mes amis et mes collègues

A ceux qui m'ont soutenu pendant toute la durée de mes études.

...je dédie ce modeste travail.

SOMMAIRE

Introduction général	1
-----------------------------	----------

CHAPITRE I :**Généralités sur les énergies éoliennes**

I. Energie solaire	4
I.1. Les procédés d'utilisation de l'énergie solaire	5
I.2. La photovoltaïque	5
I.3. L'énergie solaire thermique (CST)	6
I.4. Les potentiels solaires en Algérie	7
II. L'énergie hydraulique et géothermique	8
II.1. L'énergie hydraulique	8
II.2. L'énergie géothermique	8
II.3. Les potentiels en Algérie	9
III. Biomasse	9
III.1. Les potentiels en Algérie	9
IV. Energie éolienne	9
IV.1. Historique et progrès	10
IV.2. Principe de fonctionnement	10
IV.3. Principale composants d'une éolienne	11
IV.4. Les types de systèmes éoliens	13
IV.4.1 Classification selon l'axe de rotation	13
• Eolienne à axe vertical	13
• Eolienne à axe horizontale	13
IV.4.2 Classification selon le générateur utilisé	14
IV.5. Les potentiels en Algérie	15

CHAPITRE II :**L'énergie éolienne**

I.	Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	17
I.1.	Les Avantages	17
I.2.	Les inconvénients	18
II.	Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique (loi de Betz):	19

CHAPITRE III :**La machine asynchrone à double alimentation**

I.	Aperçu sur la machine asynchrone	23
I.1	Le stator	23
I.2	Le rotor	23
I.3	principe de fonctionnement	24
II.	La machine asynchrone à double alimentation	25
III.	Principe de fonctionnement	26
III.1.	Fonctionnement en mode moteur	26
III.2.	Fonctionnement en mode génératrice	27
IV.	Modélisation de la MADA	28
VI.1.	Hypothèses simplificatrices de la modélisation	28
VI.2.	Modèle naturel triphasé de la MADA	29
VI.3.	Modèle de la MADA dans le repère de Park	31

CHAPITRE IV**La commande adaptative**

I.	Concept des étapes à suivre pour la commande	35
II.	Différents types de commande	36
IV.1.	Commande par mode glissant	36
IV.2.	Commande multi-algorithmique	37

IV.3.	Commandes à modèle	37
III.	Commande adaptative	37
III.1.	Le principe général d'un système de commande adaptative	38
IV.	Différentes techniques de commande adaptative	39
IV.1.	Commande adaptative avec modèle de référence	39
IV.2.	commande auto-ajustable (STR : self-tuning regulator)	41
V.	Domaine d'utilisation de la commande adaptative	42

CHAPITRE V :

Application : commande adaptative d'une éolienne

Entrainant une machine asynchrone à Doublealimentation

I.	Notion d'identification	44
II.	Différents types d'identification	44
I.3.	Identification off-line	44
I.4.	Identification paramétrique en temps réel	45
III.	Le régulateur RST	48
III.1	SYNTHESE DU REGULATEUR RST	50
IV.1.1	Principe	50
IV.	Placement de pôles adaptative (auto-ajustable)	51
V.	Commande adaptative « placement de pôles » d'une éolienne	
	Entrainant une génératrice asynchrone à double alimentation	53
V.1	Effet du vent sur les performances de l'éolienne	56
V.2	Implémentation de la commande adaptative	57
V.3	Conclusion	59
	CONCLUSION GENERALE	60
	ANNEXES	
	BIBLIOGRAPHIE	

Introduction :

On ne fait pas toujours attention, mais chaque jour nous consommons beaucoup de l'énergie. Il suffit de prendre une voiture ou un bus et quelques litres de pétrole partent en fumer.

On consomme également de l'énergie quand on fait les courses, quand on achète le journal -par exemple- il a bien fallu de l'énergie pour fabriquer ce journal, et le soir lorsque on rentre chez nous nous aimons regarder la télévision, lire un livre, consulter l'email ou bien naviguer sur internet, ce qui implique à allumer tous les équipements nécessaires, en débutant avec les lampes jusqu'à la télévision, le modem, les micro-ordinateurs, et parfois les radiateurs/climatiseurs si le temps est chaud/froid. Le résultat donc est de consommer chaque année, à la moyenne, l'équivalent de 4 Tonnes de pétrole. Et ça c'est pour un citoyen. À l'échelle de la planète c'est encore plus vertigineux. En effet, nous consommons chaque année l'équivalent de 9.7 milliard de Tonnes de pétrole, on dit l'équivalent car pour produire toutes cette énergie on n'utilise pas du pétrole on utilise également du charbon et du gaz, alors avec le pétrole et ses dérivées font partie des énergies fossiles, ils sont facile à exploiter sauf que ces réserves ne sont pas inépuisable et en plus leur combustion produit le CO₂(gaz à effet de serre).

Pour l'énergie, il y a également le nucléaire, pas d'émission de gaz à effet de serre mais les centrales nucléaires produisent des déchets à effet radioactifs très dangereux, c'est une autre forme de pollution. Enfin, l'homme utilise une troisième forme d'énergie, les éléments naturels (le vent, l'eau, et le soleil), pas de déchets et en plus ce sont des énergies parfaitement renouvelables, et pourtant elles ne couvrent que 14% des besoins de la planète signalant que le nucléaire est de 7%, mais c'est très loin derrière les énergies fossiles qui couvrent 79% des besoins de la planète.

Il faut donc bien développer ces énergies renouvelables parce qu'entre le CO₂ dégagé par les énergies fossiles et les déchets nucléaires on n'a pas grand chose à faire. En effet, aujourd'hui l'énergie est essentiellement consommée par les pays industrialisés (en gros : les hémisphères nord, la nouvelle Islande, et l'Australie) ces pays consomment 64% de l'énergie produite sur la planète, alors qu'elles ne représentent que 1/4 de la population de la planète, à l'inverse, les pays du sud où vivent les 3/4 de la population ne consomment que 36% de l'énergie, cette situation n'est pas figée parce que plusieurs pays du sud espèrent atteindre le

niveau du pays du nord et pour cela ils vont consommer d'avantage d'énergie fossile moins chère, mais de l'autre coté les pays de nord veulent continuer à se développer et en utilisant l'énergie du bon marché, et le résultat est que ces énergies vont s'épuiser et l'atmosphère se pollue à force de rejeter de CO₂ et d'autres gaz polluants, par conséquent on finit par augmenter l'effet de serre, responsable de l'échauffement de la planète, qui implique l'augmentation de la température de la planète de 1.5°C jusqu'au 6°C, durant un siècle, entraînant le dérèglement des saisons et la monté des océans.

Face à cette menace les pays se sont engagés à réduire leurs émissions en gaz à effet de serre en utilisant l'énergie renouvelable. Pour l'Algérie, Le potentiel de l'énergie renouvelable est le plus important d'Afrique du Nord. Le marché des énergies renouvelables est prometteur et leur promotion constitue l'un des axes de la politique énergétique et environnementale du pays. Parmi les objectifs affichés par les pouvoirs publics, le marché local doit atteindre 500 MW en 2010, amenant la part de l'électricité produite par les énergies renouvelables à 5% de l'électricité totale produite [1].

C'est dans le cadre d'énergie renouvelable que vient s'insérer ce mémoire, basant sur la question comment peut-on exploiter les énergies du vent, soleil, l'eau toute en minimisant le cout économique et maximisant puissance électrique. Et quelle sont les techniques utilisées pour concurrencer les systèmes qui utilise l'énergie fossile.

Dans ce travail on s'intéresse à la commande adaptatif d'un système de production d'électricité basé sur l'énergie éolienne.

Le mémoire est organisé en cinq chapitres :

Dans le premier chapitre on va discuter sur les énergies renouvelables : les différents types, leurs principes, leur potentiel en Algérie.

Dans le deuxième chapitre on considère l'énergie éolienne comme un exemple pour notre étude. Cette énergie utilise le vent pour entrainer une génératrice.

Dans le troisième chapitre on va présenter le type de la génératrice utilisé pour la production d'électricité, en l'occurrence la génératrice asynchrone à double alimentation. Son choix est justifié par sa robustesse et son fonctionnement en hyper/hypo synchrone.

Dans le quatrième chapitre on s'intéresse à la présentation de la commande adaptative comme un outil naturel de prise en charge du contrôle du système éolien.

Dans Le cinquième chapitre, on va appliquer une commande adaptative basée sur un régulateur RST avec placement des pôles pour réguler le comportement de la génératrice

asynchrone à double alimentation.

Enfin, nous donnons une conclusion générale et les éventuelles perspectives de ce travail.

*Généralités sur les énergies
renouvelables*

L'utilisation de l'énergie renouvelable, surtout l'énergie solaire, a connue des grandes impulsions durant la deuxième moitié de 1970 juste après la première crise pétrolière. De ces jours les problèmes économiques ont été les très grands facteurs de la naissance de cette utilisation, mais dès que les prix du pétrole sont diminués l'intérêt à ce genre d'énergie est disparu. De nos jours l'intérêt à l'énergie renouvelable est réanimé du au besoin de réduire l'impact environnemental, très élevé, produit par l'utilisation des énergies fossile [2]. On distingue plusieurs types d'énergie renouvelable, parmi ces énergies : « l'énergie solaire, hydraulique, géothermie, biomasse, et l'énergie éolienne ».

I. Energie solaire :

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité [1].

Le soleil nous fournis chaque jours environ 150.000 TWde l'énergie, la moitié de cette énergie atteint la surface de la terre et le reste est refoulé vers l'espace extérieur par l'atmosphère (figure 1). Seulement une petite fraction de l'énergie solaire disponible absorbée par la terre va satisfaire largement la demande de l'énergie globale désirée. Une des grandes occasions scientifique et technologique consiste à convertir, emmagasiner et utiliser l'énergie solaire avec des couts abordable. Cependant, il existe deux inconvénients concernant les systèmes d'énergie renouvelable [2]:

- Le cout résultant n'est pas compétitif.
- L'énergie solaire n'est pas toujours disponible.

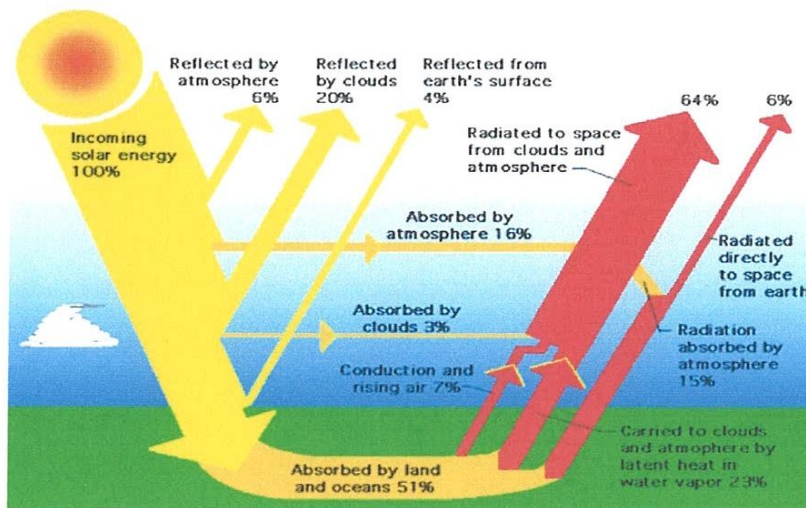


Figure (1) : l'énergie solaire absorbée par la terre.

I.1. Les procédés d'utilisation de l'énergie solaire :

L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés [1]:

- L'énergie solaire photovoltaïque.
- L'énergie solaire thermique.
- L'énergie solaire passive:est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser directement la lumière pour le chauffage.

I.2. La photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène appelé *effet photovoltaïque* « découvert en 1839 par Edmond Becquerel » elle consiste à transformer directement la lumière en énergie électrique « courant continu ».

Ces cellule sont fabriquées à base de semi-conducteurs, généralement en silicium, elles ont une structure en quatre couches : une grille conductrice, une couche de silicium dopée n, une couche de silicium dopée P, et une grille :

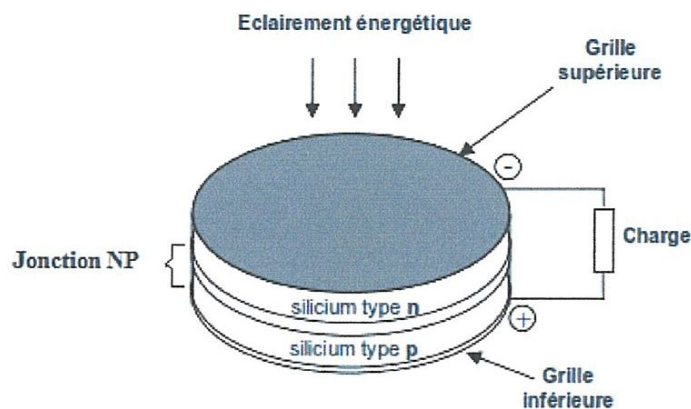


Figure (2) : décomposition d'une cellule photovoltaïque.

L'association de plusieurs cellules PV (photovoltaïque) nous donne un générateur photovoltaïque (GPV), elle peut être en série ou en parallèle. La plupart des panneaux PV commerciaux sont constitués par des sous-réseaux de cellules connectés en série, chacun de ces sous-réseaux est lui-même constitué d'un groupe de cellules PV connectées en série. Le nombre de cellules par sous-réseaux est le fruit d'un compromis économique entre protection et

perte d'une partie importante du GPV en cas de défaut partiel [3].

On peut classer les systèmes PV selon la connexion au réseau et selon le mécanisme de poursuite du soleil, pour la classification des systèmes PV selon la connexion au réseau, on distingue :

- **Systèmes autonomes :**

C'est un système PV complètement indépendant d'autres sources d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en sites isolés, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique[1].

- **Systèmes PV connectés au réseau :**

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur courant continu- courant alternatif (CC-CA). Étant donné que l'énergie est normalement emmagasinée dans le réseau même, les accumulateurs ne sont pas nécessaires à moins que nous ne voulions une forme autonome d'énergie pendant les pannes d'électricité. L'énergie produite est consommée sur place le surplus étant injecté dans le réseau, qui alimente les maisons de nuit ou pendant les jours sans soleil[1].

Et pour la classification des systèmes PV selon la poursuite du soleil on distingue :

- **Systèmes fixés.**
- **Systèmes de poursuite à un axe.**
- **Systèmes de poursuite à deux axes.**

I.3. L'énergie solaire thermique (CST):

Les systèmes de ce genre d'énergie consistent à utiliser les outils optiques « habituellement les miroirs » et des systèmes de poursuite de la lumière solaire, pour concentrer cette dernière dans une surface de réception petite, et ensuite utiliser l'énergie solaire concentrée comme source thermique pour des stations de production conventionnelles[2].

Le but principal de la concentration de l'énergie solaire est pour produire des

températures plus élevées et des efficacités de thermodynamique plus élevées.

I.4. Les potentiels solaires en Algérie :

Par sa situation privilégiée, l'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen. La durée moyenne d'ensoleillement du territoire algérien dépasse les 2000 heures annuelles, pour atteindre près de 3500 heures d'ensoleillement dans le désert du Sahara. Le total d'énergie reçue est estimé à 169400 TWh/an, soit 5000 fois la consommation d'électricité annuelle du pays [1].

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

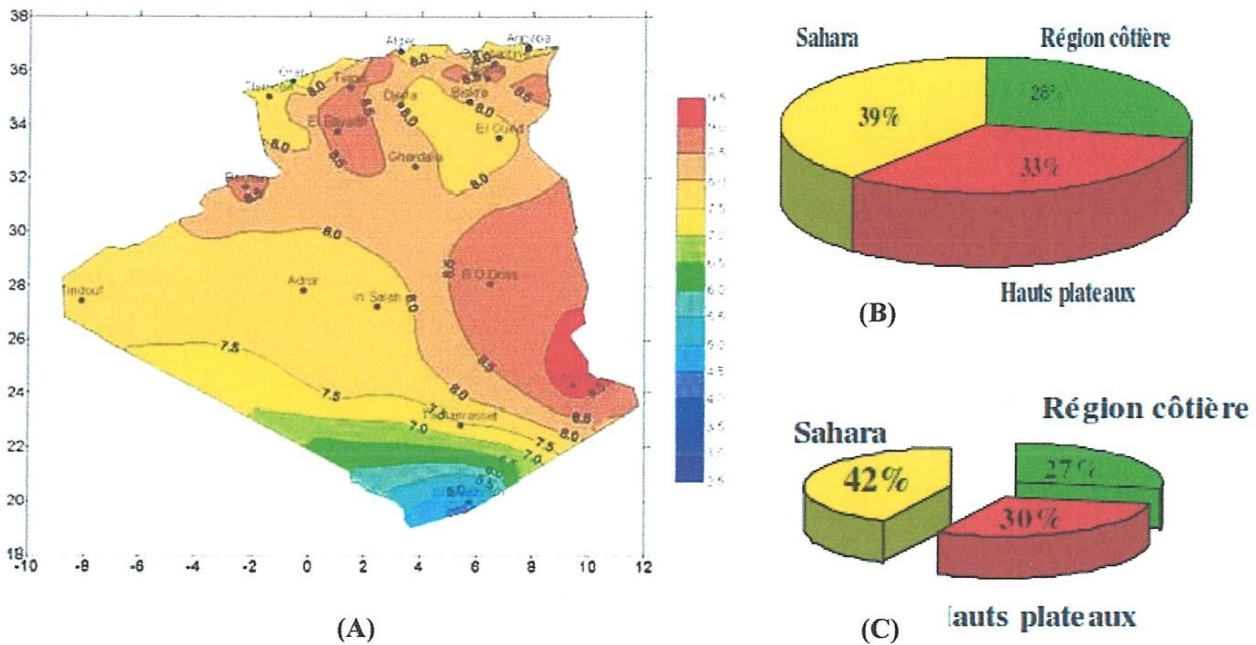


Figure (3) : (A) :Carte de l'irradiation en Algérie (mois de juillet). (B): Durée moyenne d'ensoleillement en Algérie. (C): Energie moyenne reçue en Algérie.

II. L'énergie hydraulique et géothermique [4]:

L'énergie hydraulique et géothermique sont deux types d'énergie où elle est emmagasinée dans deux différentes formes d'eau, l'hydraulique utilise l'eau liquide par contre l'énergie géothermique provient de l'énergie des eaux chaudes, ou n'importe quelle source chaude, situés dans la croûte de la terre.

II.1. L'énergie hydraulique :

La puissance hydroélectrique utilise la quantité massive de l'énergie qui existe dans les grands volumes de flux d'eau, la méthode principale pour exploiter l'énergie hydraulique est de construire les grands barrages à travers les rivières ce qui mène à croître l'énorme quantité d'eau en formant des grands réservoirs, ensuite le flux résultant à cause de mouvement d'eau dans les tuyaux de ces réservoirs fait tourner les turbines et enfin une énergie électrique est produite. La puissance hydraulique représente **25%** de la génération énergétique mondial[4].

II.2. L'énergie géothermique :

Pour l'énergie géothermique on constate trois types de sources d'énergies où chacune se produit sous la terre et bloquée entre les formations de roches dans les fentes, ces types sont [4]:

- **La vapeur humide :** elle est constituée de chaudes gouttelettes d'eau et de vapeur.
- **La vapeur sèche :** elle ne contient que la vapeur d'eau.
- **L'eau chaude.**

Pour convertir l'énergie géothermique à l'énergie électrique, on distingue:

- **Stations des vapeurs sèches :** elles sont constituées de pompes qui pompent la vapeur sèche directement vers les turbines.
- **Stations de vapeur rapide :** elles extraient l'eau chaude souterraine et la convertissent en vapeur, pour faire tourner les turbines.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie de profondeur (haute et basse énergie), présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). C'est donc une source d'énergie quasi-continue, car elle est interrompue uniquement par des opérations de maintenance sur la centrale géothermique ou le réseau de

distribution de l'énergie[1].

II.3. Les potentiels en Algérie:

Plus de 200 sources d'eau chaude ont été répertoriées dans le nord-est et le nord-ouest de l'Algérie. Environ 33% d'entre elles ont des températures supérieures à 45°, la plus chaude étant située à Bskra (118°). Plus au sud, délimité par Bskra au nord, In-Salah au sud et Adrar à l'ouest, la nappe albiennne constitue une zone de plusieurs milliers de km, caractérisée par une eau à température moyenne de 57°. L'ensemble du débit d'exploitation des sources et de cette nappe représente une puissance estimée à 700MW/an[1].

La part de l'énergie hydraulique dans la production nationale d'électricité est encore faible (1,7% de la production installée), et cela est dû au nombre insuffisant de sites et à la faible exploitation de ceux existants[1].

III. Biomasse :

La biomasse est répartie en quatre catégories : la biomasse sèche (bois, déchets agricoles..), le biogaz, les déchets municipaux renouvelables solides et la biomasse humide (bioéthanol, biodiesel, huile végétal...).

En 2005, la biomasse est la deuxième source d'électricité renouvelable mondiale avec 1 % de la production d'électricité mondiale [5].

III.1. Les potentiels en Algérie :

Le potentiel de biomasse se répartit entre les déchets issus des activités humaines, déchets urbains et agricoles non recyclés, estimés à 1,33 MTEP/an (Tonne équivalent pétrole) et l'énergie issue du bois des forêts. Cette dernière représente 37 MTEP/an et le potentiel récupérable de 3,7 MTEP/an[1].

IV. Energie éolienne :

Le vent est une source d'énergie renouvelable, économique, exploitable, avec un bon niveau de sécurité et respectueuse de l'environnement. Dans le monde entier, les ressources d'énergies éoliennes sont pratiquement illimitées. Les récents développements technologiques dans les domaines des turbines éoliennes à vitesse variable, en électronique de puissance et en commande de machine électrique tendent à rendre l'énergie éolienne aussi compétitive que l'énergie d'origine fossile[6].

IV.1. Historique et progrès :

Dans nos jours, L'énergie éolienne est une énergie renouvelable développée d'une façon vaste, la première turbine éolienne pour la génération électrique a été développée à la fin du 19^{ième} siècle. De 1940 jusqu'au 1950, deux technologies importantes ont été développées qui sont: la structure des trois hélices de la turbine éolienne et le générateur AC qui a remplacé le générateur DC. Durant la période de 1973 jusqu'au 1979, les crises pétrolières mènent à faire plusieurs recherches concernant les générateurs éoliens. À la fin de 1990, l'énergie éolienne a eu un rôle important dans le domaine des énergies durables. Au même temps, les technologies de la turbine éolienne ont été développées dans le monde entier surtout en Danemark, Allemagne, et l'Espagne. Aujourd'hui, l'énergie éolienne grandit rapidement, plus rapide que les autres énergies renouvelable. Cependant, l'énergie éolienne présente moins de 1% de la demande électrique mondiale et estimée à atteindre 12% en 2020 [7].

IV.2. Principe de fonctionnement :

Un générateur éolien consiste à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique et puis en énergie électrique. Le principe est simple, lorsque les pales tournent du aul'effet du vent ils font tourner le rotor de la génératrice qui est localisée dans la nacelle, mais la vitesse de rotation de la génératrice est plus grande que la vitesse des palles grâce au multiplicateur qui fait multiplier la vitesse de rotation des palles. Lorsque le rotor tourne une énergie électrique se produit.

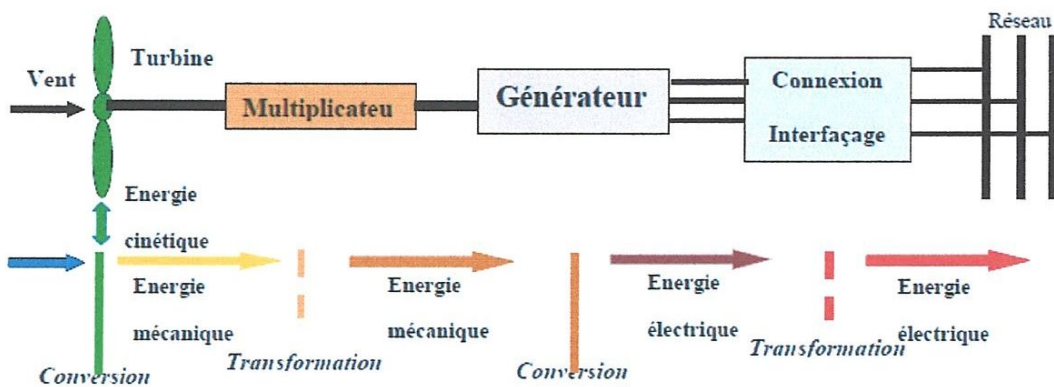
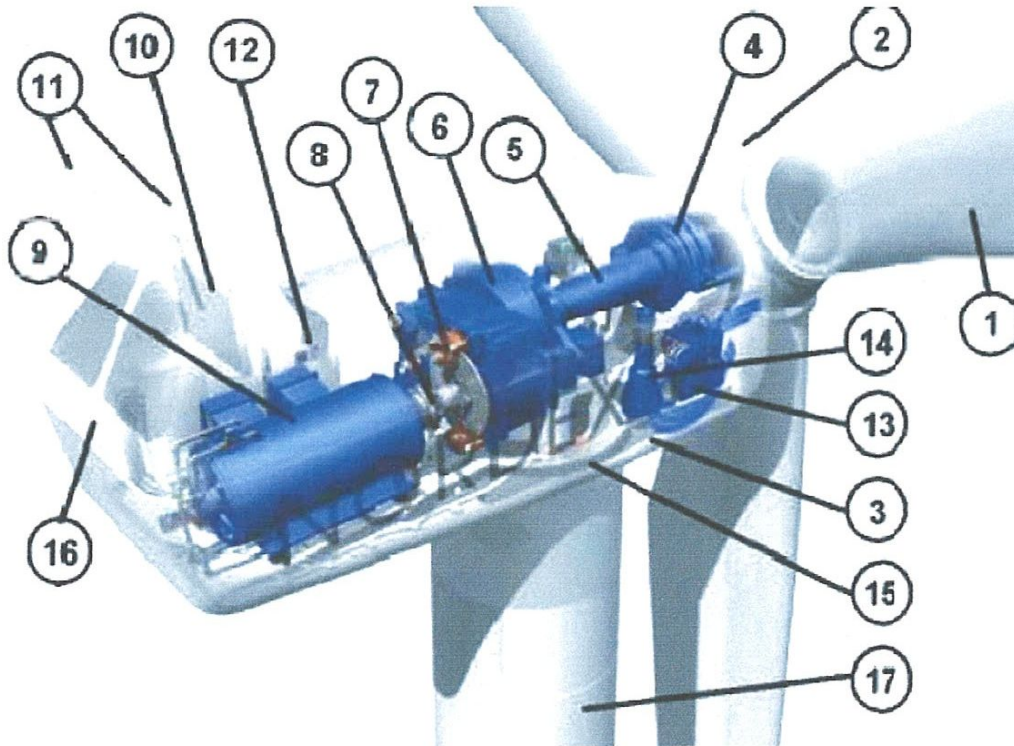


Figure (4) : Principe de la conversion d'énergie

IV.3. Principale composants d'une éolienne :

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux:



- | | |
|--|--|
| 1 : pales, | 2 : moyeu rotor, |
| 3 : nacelle, | 4 : cardan, |
| 5 : transmission, | 6 : multiplicateur de vitesse, |
| 7 : frein à disque, | 8 : accouplement, |
| 9 : génératrice, | 10 : radiateur de refroidissement, |
| 11 : centrale de mesures du vent, | 12 : contrôle, |
| 13 : centrale hydraulique, | 14 : mécanisme d'orientation face au vent, |
| 15 : paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque, | 16 : capot. |
| | 17 : mât. |

Figure (5) : les différents composants de l'éolienne.

- **Le mât :** généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90m, mât de 80 m de hauteur)[8].
- **La nacelle :** regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne[8].
- **Le rotor :** formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit [9].

Les rotors à vitesse fixe sont souvent munis d'un système d'orientation de la pale permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écurie) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être 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).

IV.4. Les types de systèmes éoliens :

On peut classer les systèmes éoliens selon deux aspects : selon la constitution géométrique de l'arbre « axe verticale, horizontale », ou selon la constitution organique « type de génératrice utilisée ».

IV.4.1 Classification selon l'axe de rotation :

Les éoliennes se divisent selon ce type de classification en deux grandes familles : « éolienne à axe verticale, éolienne à axe horizontale » :

- **Eolienne 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[10] , et aussi[7]:

- Maintenance facile du générateur et de la boîte de vitesse car ils sont montés sur terre.
- réception du vent de n'importe quelle direction (pas de déviation du contrôle requis).
- Simple conception des pales et cout de fabrication bas.

Mais :

- Elle ne commence pas à tourner d'une façon autonome, il faut que le générateur marche en mode moteur au début.

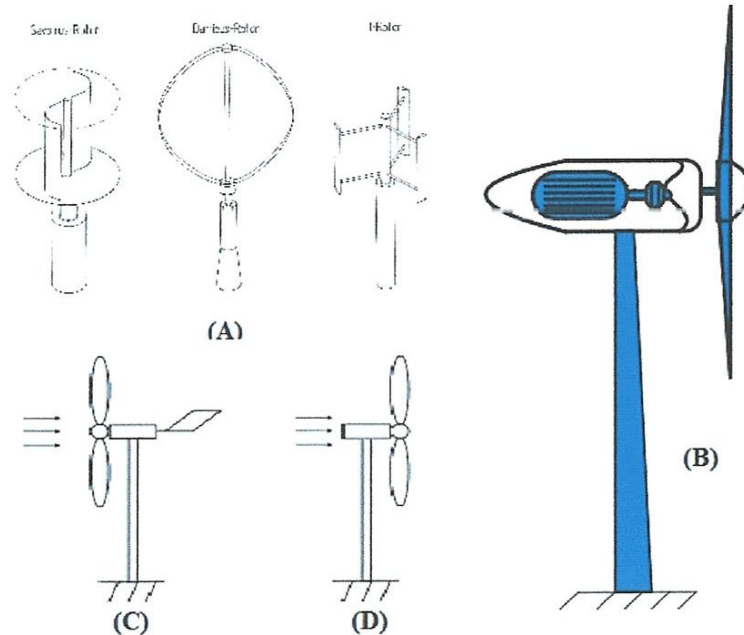
- **Eolienne à axe horizontale :**

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales 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[10]. Elles sont les plus utilisées dans le monde entier car à[7]:

- Efficacité très élevée.
- Capable de faire tourner les hélices.
- Cout bas par rapport à la puissance fournie.

Mais :

- Le générateur et le multiplicateur doivent être montés au dessus d'une tour, ce qui restreint les entretiens.
- La conception requise est complexe due au besoin de la déviation ou d'une queue de guidage.
Ce type d'éolienne lui-même se divise en, selon la direction su vent reçue, deux partie : « amont, aval ».



**Figure (6) : A) : éolienne à axe verticale. B) : éolienne à axe horizontale.
C) : éolienne en amont. (D) : éolienne en aval.**

IV.4.2 Classification selon le générateur utilisé :

Selon la génératrice utilisée pour produire l'électricité, on classe cinq types d'éolienne[10] :

- Eolienne à une Turbine entraînant une génératrice à courant continu.
- Eolienne à une Turbine entraînant une génératrice asynchrone à vitesse constante.
- Eolienne à une Turbine entraînant une génératrice asynchrone à vitesse variable.
- Eolienne à une Turbine entraînant une génératrice asynchrone à double alimentation.
- Turbine entraînant une génératrice synchrone à aimants permanents à vitesse

variable.

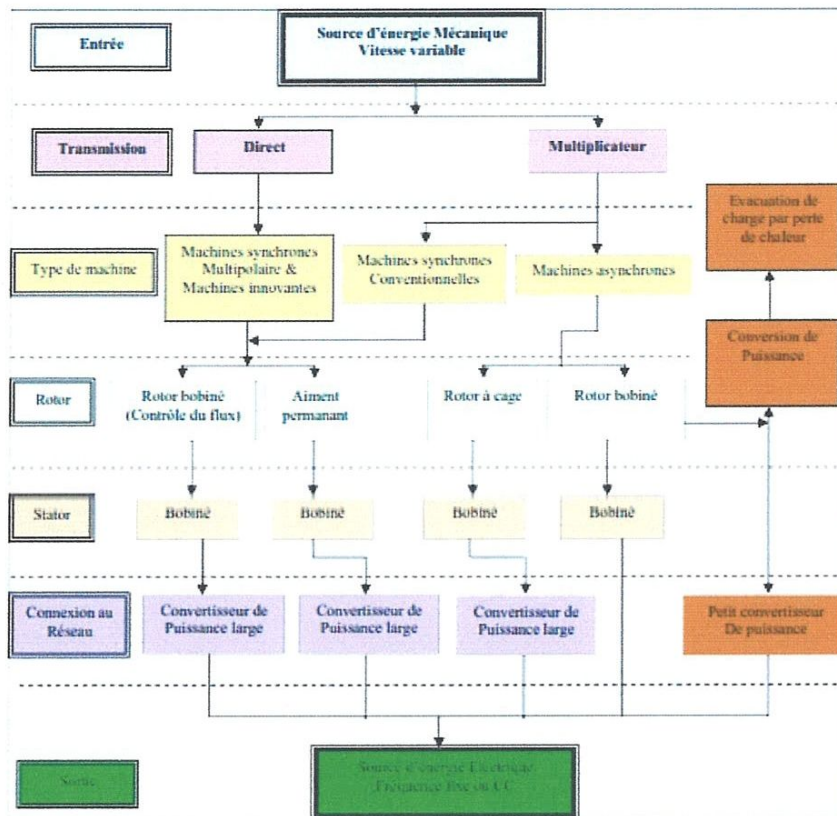


Figure (7) : types de conversion électrique.

IV.5. Les potentiels en Algérie :

Le potentiel éolien diverge selon la situation géographique. Ainsi au nord du pays, le potentiel éolien se caractérise par une vitesse moyenne des vents modérée (1 à 4 m/s) avec des microclimats autour d'Oran, Annaba, sur les hauts plateaux et à Bskra. Au Sud, la vitesse moyenne des vents dépasse les 4m/s, plus particulièrement au sud-ouest, avec des vents qui dépassent les 6m/s dans la région d'Adrar [1].

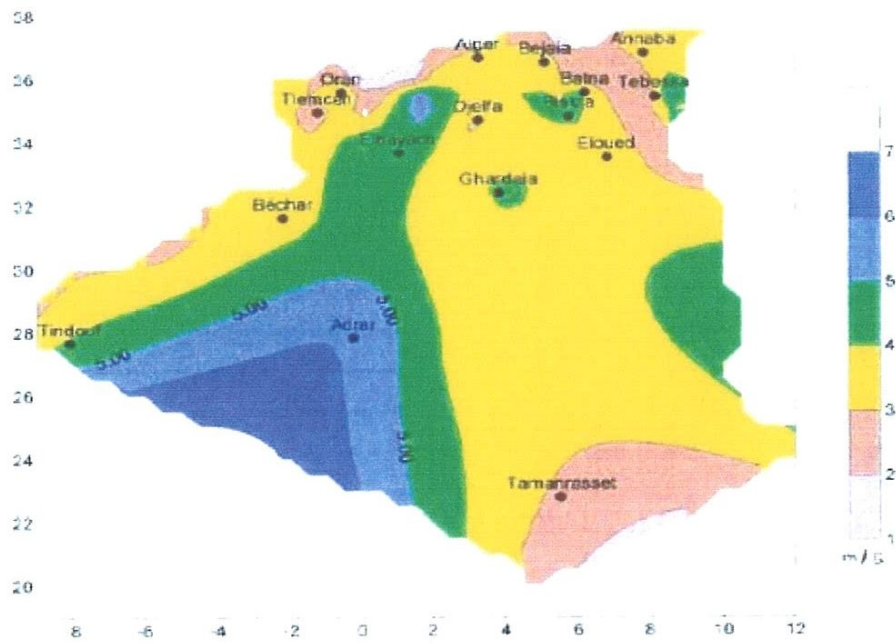


Figure (8) : la carte des vents en Algérie.

L'énergie éolienne

De nos jours, l'énergie éolienne apparaît clairement en bonne place, non pas en remplacement des sources conventionnelles, mais comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie nucléaire et l'énergie thermique. En effet l'énergie potentielle des masses d'air en mouvement représente, au niveau mondial, un gisement considérable. Actuellement, plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne. C'est le cas de l'Allemagne, leader mondial avec une puissance éolienne installée de 12 GW, l'Espagne, numéro deux de l'Union Européenne avec 4,15 GW et le Danemark avec 2,9 GW à la fin de l'année 2002 [8].

Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance depuis plus de 10 ans et cela devrait continuer pendant les 20 prochaines années [11][12]. Les raisons de cette croissance résident dans la forte volonté de développement de cette filière mais également dans des coûts de production qui deviennent de plus en plus compétitifs. La production énergétique dépend ensuite de l'intensité des vents (vitesse moyenne) et de leur variabilité. On considère que les bons sites éoliens terrestres conduisent à un fonctionnement équivalent à pleine puissance de plus de 2000 heures par an, certains sites dépassent les 3000 heures, mais c'est plutôt en zone offshore que l'on rencontre de telles conditions [11][13].

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie.

I. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

I.1. Les Avantages :

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

- L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO₂.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO₂, 21 mille tonnes de SO₂ et 17,5 mille tonnes de NO_x. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.

- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque 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 en ne laissant pas de trace.

L'énergie éolienne a d'autre part des atouts économiques certains :

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.

I.2. Les inconvénients :

- L'impact visuel.
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro turbines.
- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la 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 développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus

négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.

- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques ; bien qu'en terme de coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites, c'est-à-dire là où il y'a le plus de vent. Concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

II. Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique (loi de Betz):

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure ci-dessous sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. C'est la théorie de Betz :

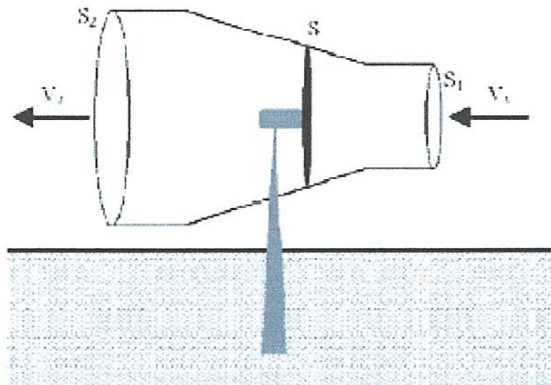


Figure (8) : Tube de courant autour d'une éolienne [8]

La production d'énergie ne peut se faire qu'au préjudice de l'énergie cinétique du vent, la vitesse V_2 est nécessairement inférieure à V_1 . Il en résulte que la veine fluide traverse les pales en s'élargissant. Désignons par V , la vitesse de l'aire à la traversée de l'aéromoteur et par S la surface balayée par les pales. L'égalité qui traduit l'incompressibilité de l'air et la permanence de l'écoulement s'écrit :

$$S_1 * V_1 = S * V = S_2 * V_2 \quad (2.1)$$

La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad (2.2)$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = m \frac{V_1^2 - V_2^2}{2} \quad (2.3)$$

On remplace maintenant l'expression de « m » dans « P_m » :

$$P_m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (2.4)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad (2.5)$$

Où :

ρ : La densité de l'air qui est égale à 1,22 kg/m³ à la pression atmosphérique à 15°C.

S : la surface balayée par l'hélice « m² ».

V_1 : la vitesse du vent.

P_m : la puissance en Watt.

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{V_1}{V_2}\right) \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right) \quad (2.6)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus, on s'aperçoit que le ratio « P_m/P_{mt} » appelé aussi coefficient de puissance « C_p » présente un maximum de 16/27 soit 0,59. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée.

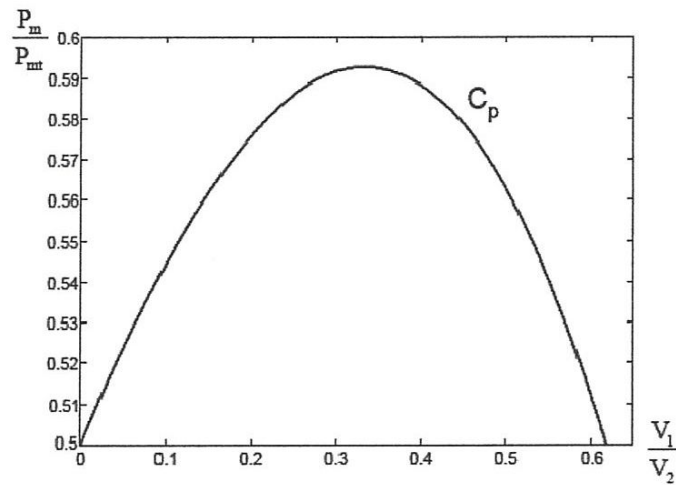


Figure (9) : Coefficient de puissance.

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

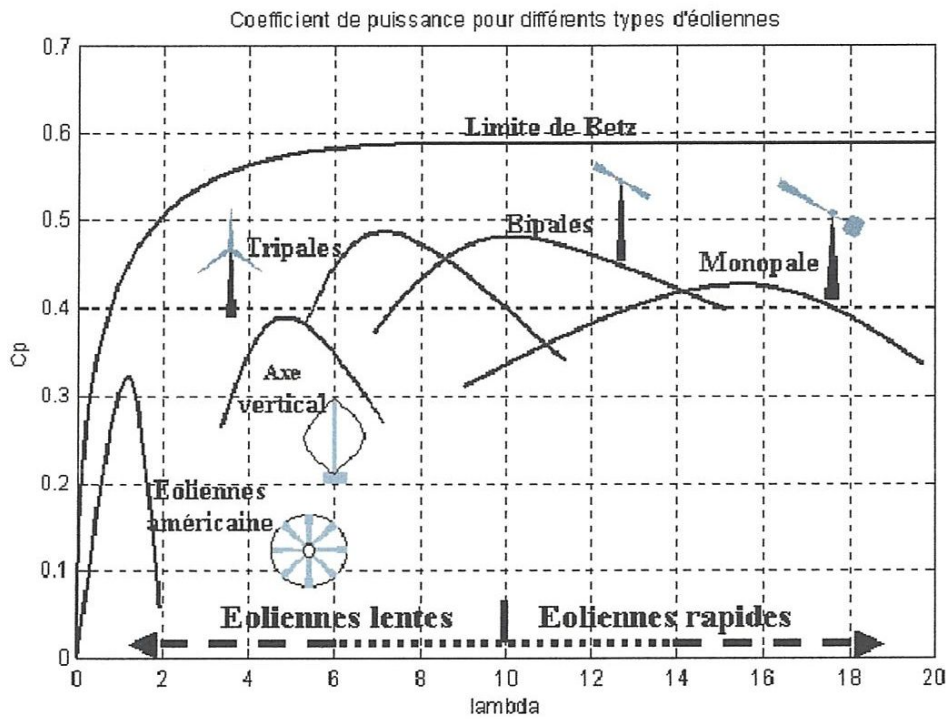


Figure (10) : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40),leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leurcoefficient de puissance (Figure 10) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la

montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (Figure 10) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s [14].

En combinant les équations (2.2), (2.5) et (2.6), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = C_p * P_{mt} = 0.5 * C_p(\lambda) * \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (2.7)$$

Avec : $\lambda = \Omega_1 R / V_1 \quad (2.8)$

Où :

ρ : densité de l'air.

R : rayon de l'aérogénérateur.

Ω_1 : vitesse de rotation avant multiplicateur

Tenant compte du rapport du multiplicateur de vitesse K , la puissance mécanique P_{mg} disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_{mg} = 0.5 C_p(\lambda) \left(\frac{\Omega_2 R}{K V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (2.9)$$

Où: Ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur.

*La machine asynchrone à double
alimentation*

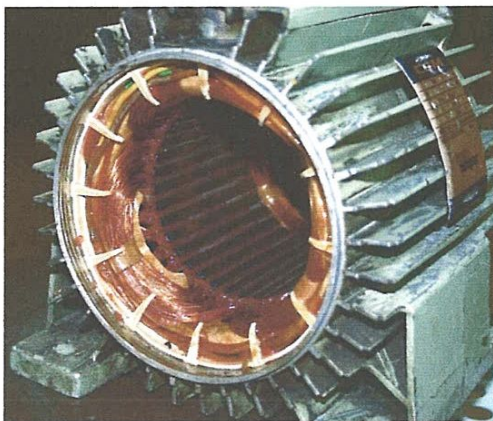
I. Aperçu sur la machine asynchrone :

La machine asynchrone est la machine la plus répandue dans l'industrie, sa robustesse et son fiable encombrement présentent deux avantages de plusieurs avantages qui donnent à cette machine cette extension dans l'environnement industriel, on peut citer aussi : sa simplicité, l'entretien facile.

Elle comprend deux parties principales : partie fixe « **stator** » et partie tournante « **rotor** ».

I.1 Le stator :

Le stator comporte une carcasse en acier renfermant un empilage de tôles identiques qui constituent un cylindre vide, ces tôles sont percées de trous à leur périphérie intérieure. L'alignement de ces trous forme des encoches dans lesquelles on loge un bobinage triphasé[15].



(A)



(B)

Figure (11) : (A) : le stator d'une machine asynchrone.(B) : les encoches du stator où se loge le bobinage.

I.2 Le rotor:

Le rotor se compose d'un cylindre de tôles poinçonnées à leur périphérie extérieure pour former les encoches destinées à recevoir des conducteurs. Il est séparé du stator par un entrefer très court de l'ordre de 0,4 à 2 mm seulement [15]. Il existe deux types de rotors: « Le rotor à cage d'écureuil » et le « rotor bobiné ».

- **Le rotor à cage d'écureuil :**

L'enroulement du rotor à cage d'écureuil est constitué de barres de cuivre nues

introduites dans les encoches; ces barres sont soudées à chaque extrémité à deux anneaux qui les court-circuitent. L'ensemble ressemble à une cage d'écureuil d'où le nom de rotor à cage d'écureuil, ou simplement rotor à cage[15].

- **rotor bobiné :**

Le rotor bobiné comprend un bobinage triphasé, semblable à celui du stator, placé dans les encoches. Il est composé de trois enroulements raccordés en étoile.

Les extrémités libres de chaque enroulement rotoriques sont reliées à des bagues tournantes avec l'arbre. Ces bagues sur lesquelles appuyant trois balais, où ils sont court-circuités en fonctionnement normale. On peut aussi ajouter en série avec le circuit rotorique des éléments utilisés pour la régulation « résistance, électronique de puissance... » [16].

Il existe d'autres types de rotor : « rotor à double cage, rotor à encoche profonde ».

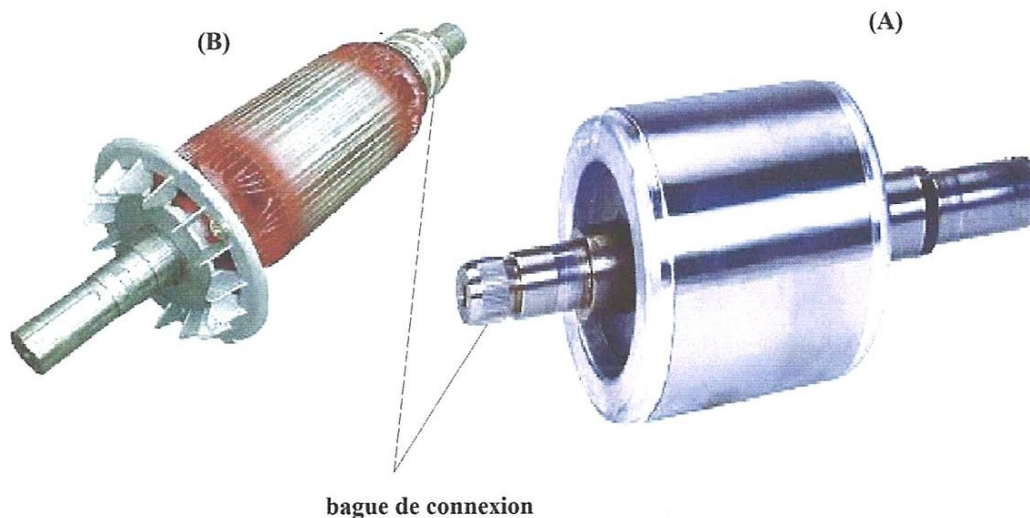


Figure (12): (A) :rotor à cage, (B) : rotor bobiné.

I.3 principe de fonctionnement :

- **Mode moteur :**

Lorsque le stator est alimenté par le réseau triphasé cela induit un champ électromagnétique tournant dans l'entrefer entre le rotor et le stator et comme le rotor est constitué du conducteur et selon le principe de magnétisme une tension induite dans les conducteurs qui sont dessous le champ magnétique, ces conducteurs sont court-circuités alors un courant circule dans ces conducteur ce qui mène à produire une force appelée « force de

Laplace » descendante ou montante, selon la direction du courant, exerce un moment sur le rotor. Pour que le rotor tourne, la vitesse du champ magnétique induit par le stator « vitesse de synchronisme » doit être supérieure à la vitesse du rotor. C'est le principe de la machine asynchrone.

- **Mode génératrice :**

Le principe est le même sauf que la machine fonctionne inversement, au lieu d'alimenter le stator pour entrainer la rotation du rotor on fait tourner le rotor en utilisant l'énergie mécanique pour entrainer un courant dans le stator. Pour que la machine fonctionne en mode génératrice il faut que le rotor, tournant dans le sens du champ tournant, tourne à une vitesse de rotation supérieure à la vitesse de synchronisme.

$$\Omega_s = (60 \cdot f) / p \quad (3.1)$$

Ω_s : la fréquence de synchronisme.

P : nombre de pair de pôles.

f : la fréquence.

Et le glissement de la machine définie par :

$$g = (\Omega_s - \Omega_r) / \Omega_s \quad (3.2)$$

Ω_r : vitesse de rotation.

II. La machine asynchrone à double alimentation :

La machine asynchrone à double alimentation est une machine, généralement, à rotor bobiné. Comme la machine asynchrone, le stator est relié directement au réseau triphasé. Mais, au lieu des charges résistives les enroulements du rotor sont connectés au réseau triphasé par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance.

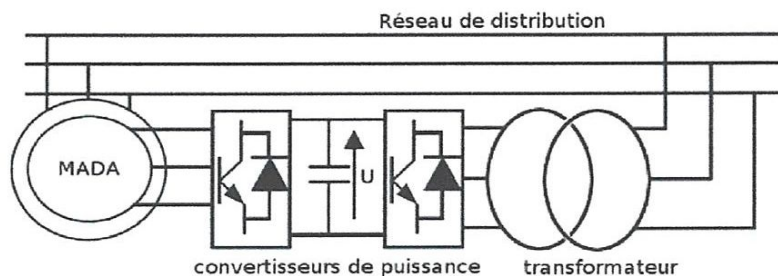


Figure (13) : schéma d'une MADA.

Dans la machine asynchrone, le rotor tourne avec une vitesse, imposée par le réseau de distribution, presque constante et au voisinage de la vitesse de synchronisme. Dans la MADA la vitesse de rotation du rotor est variable, elle peut être « hyposynchrone » ou « hypersynchrone ».

Comme la machine asynchrone classique, la MADA permet de fonctionner en moteur ou en génératrice. Mais la grande différence réside dans le fait que pour la MADA, ce n'est plus la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement moteur ou générateur.

Effectivement, une machine asynchrone doit tourner au-dessous de sa vitesse de synchronisme pour être moteur et au-dessus pour être générateur. Pour la MADA, c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de générer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper-synchronisme ou en hypo-synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur.

III. Principe de fonctionnement :

III.1. Fonctionnement en mode moteur :

- **Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone :**

En mode moteur hypo-synchrone le réseau fournit une puissance au stator et en même temps il absorbe la puissance transmise par le rotor (figure 14.a). C'est un fonctionnement en mode moteur au-dessous de la vitesse de synchronisme.

- **Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone :**

En mode moteur hyper-synchrone le réseau fournit une puissance au stator et au rotor (figure 14.b). C'est un fonctionnement en mode moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme.

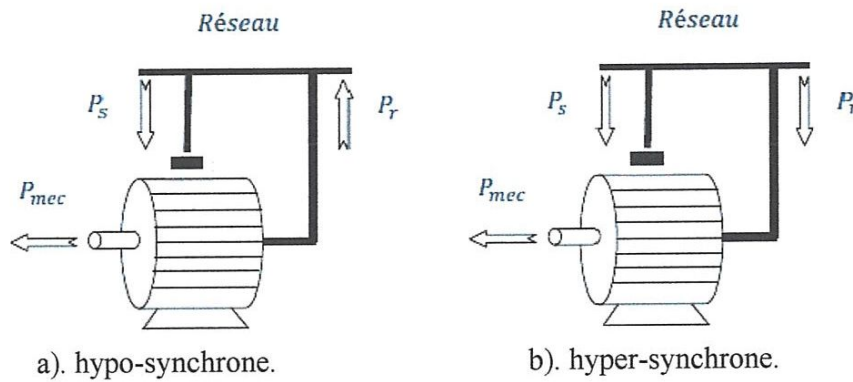


Figure (14) : Fonctionnement de la MADA en mode moteur.

III.1. Fonctionnement en mode génératrice :

- **Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone :**

Dans ce mode de fonctionnement le stator fournit une puissance au réseau et le rotor absorbe une puissance provient du. Nous avons dans ce cas un fonctionnement en mode générateur en dessous de la vitesse de synchronisme (figure 15.a).

- **Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone :**

En mode générateur hyper-synchrone la puissance est fournie au réseau par le stator et ainsi par le rotor (la puissance fournie par le rotor ou absorbée est la puissance du glissement). On a ainsi un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme.

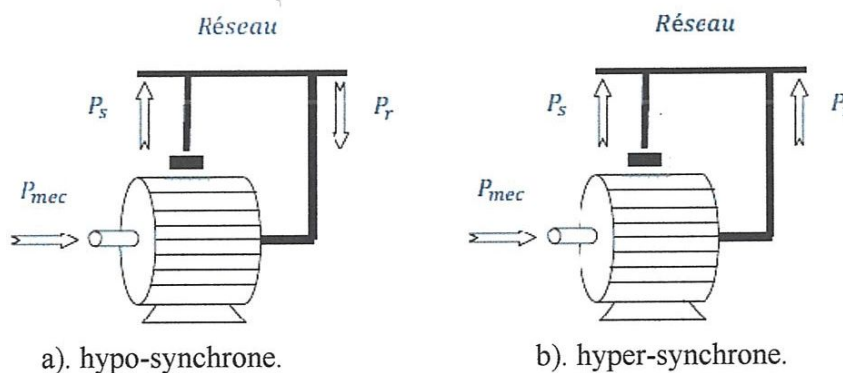
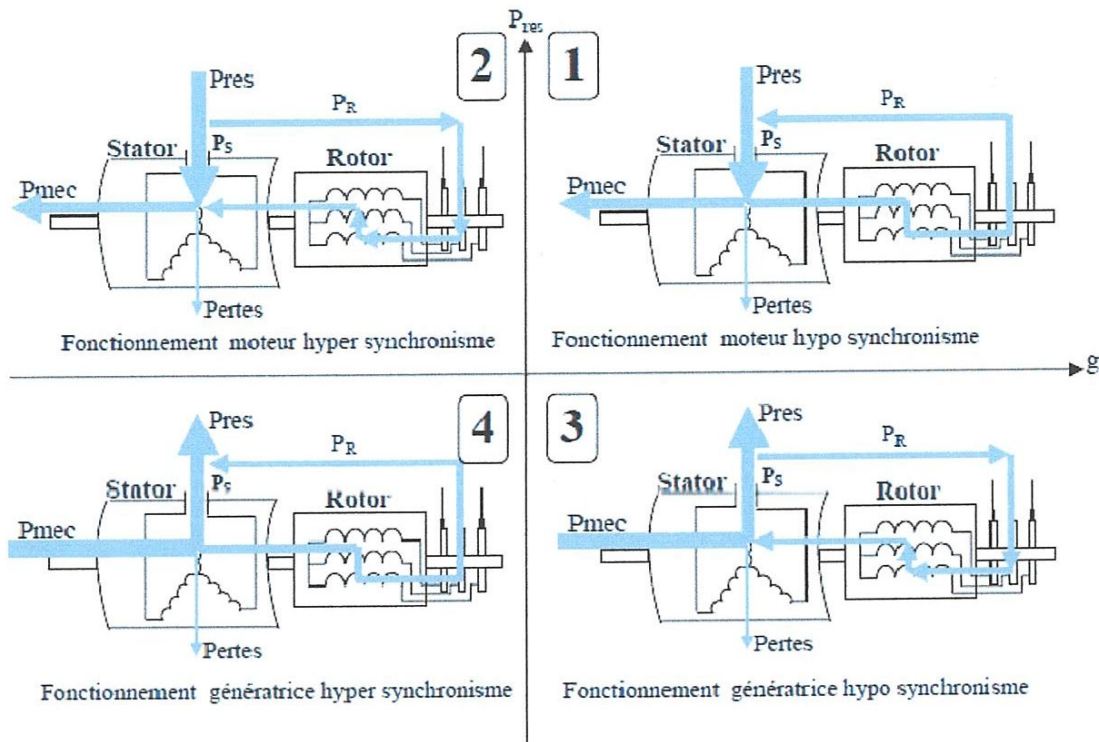


Figure (15) : Fonctionnement de la MADA en mode génératrice.



Figure(16) :Quadrant de fonctionnement de la MADA.

IV. Modélisation de la MADA :

VI.1. Hypothèses simplificatrices de la modélisation :

A cause de la répartition des enroulements de la MADA et la géométrie propre complexe et afin de faciliter les difficultés, on prend quelques hypothèses simplificatrices avancées habituellement pour modéliser les machines électriques en vue de leur commande en général :

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable ;
- La force magnétomotrice a une répartition spatiale sinusoïdale ;
- La machine a une construction symétrique ;
- 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 (effet pelliculaire).

VI.2. Modèle naturel triphasé de la MADA :

Basant sur les hypothèses citées au-dessus on peut exprimer un modèle de la MADA en utilisant les relations ci-dessous, il faut bien noter que le mode de fonctionnement n'est pas accès important pour la modélisation de la machine.

$$\begin{aligned} \text{relations statoriques :} \quad & [V_s] = [V_{as} V_{bs} V_{cs}]^T \\ & [I_s] = [i_{as} i_{bs} i_{cs}]^T \\ & [\phi_s] = [\phi_{as} \phi_{bs} \phi_{cs}]^T \end{aligned} \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} \text{relations rotoriques:} \quad & [V_r] = [V_{ar} V_{br} V_{cr}]^T \\ & [I_r] = [I_{ar} I_{br} I_{cr}]^T \\ & [\phi_r] = [\phi_{ar} \phi_{br} \phi_{cr}]^T \end{aligned} \quad (3.4)$$

Les équations des tensions statoriques et rotoriques sont :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d[\Phi_s]}{dt} \quad (3.5)$$

$$[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d[\Phi_r]}{dt} \quad (3.6)$$

Les équations des flux statoriques et rotoriques sont:

$$[\phi_s] = [L_s][I_s] + [M_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad (3.7)$$

$$[\phi_r] = [L_r][I_r] + [M_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \quad (3.8)$$

Où :

$[R_s], [R_r]$: sont les matrices des résistances statorique et rotorique.

$[L_s], [L_r]$: sont les matrices des inductances propres statorique et rotorique.

$[M_{sr}], [M_{rs}]$: sont les matrices des inductances mutuelles entre le stator et le rotor.

$[M_{ss}], [M_{rr}]$: sont les matrices des inductances mutuelles statorique-statorique et rotorique-rotorique.

$$\text{Avec :} \quad \begin{cases} [R_s] = R_s [ID]_{3 \times 3} \\ [R_r] = R_r [ID]_{3 \times 3} \end{cases} \quad (3.9)$$

$$\begin{cases} [L_s] = L_s [ID]_{3 \times 3} \\ [L_r] = L_r [ID]_{3 \times 3} \end{cases} \quad (3.10)$$

$$[M_{ss}] = M_{ss} \begin{pmatrix} 0 & \cos\left(2\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(2\frac{\pi}{3}\right) \\ \cos\left(2\frac{\pi}{3}\right) & 0 & \cos\left(2\frac{\pi}{3}\right) \\ \cos\left(2\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(2\frac{\pi}{3}\right) & 0 \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

$$[M_{ss}] = M_{ss} \begin{pmatrix} 0 & \cos\left(2\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(2\frac{\pi}{3}\right) \\ \cos\left(2\frac{\pi}{3}\right) & 0 & \cos\left(2\frac{\pi}{3}\right) \\ \cos\left(2\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(2\frac{\pi}{3}\right) & 0 \end{pmatrix} \quad (3.12)$$

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - 2\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - 4\frac{\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - 4\frac{\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta - 2\frac{\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - 2\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - 4\frac{\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (3.13)$$

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - 4\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - 2\frac{\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - 2\frac{\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta - 4\frac{\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - 4\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - 2\frac{\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (3.14)$$

Où:

$[\mathbf{ID}]_{3 \times 3}$: est la matrice identité d'ordre 3.

$\mathbf{R}_s, \mathbf{R}_r$: sont les résistances statorique et rotorique par phase.

$\mathbf{L}_s, \mathbf{L}_r$: sont les inductances statorique et rotorique par phase.

$\mathbf{M}_{ss}, \mathbf{M}_{rr}$: sont les maximums des inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques respectivement à axes confondus.

\mathbf{M} : est le maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique pour $\theta = 0$.

D'autre part, l'équation fondamentale de rotation du rotor est donnée par :

$$T_{em} - T_r = J_e \frac{d\Omega_e}{dt} + D_e \Omega_e \quad (3.15)$$

Où :

$$\Omega_e = w / p \quad (3.16)$$

Avec : J_e : moment d'inertie total sur l'arbre de la machine.

T_{em} : couple électromagnétique.

T_r : couple résistant.

D_e : coefficient de frottement.

Ω_e : la vitesse de rotation de la machine.

Par ailleurs, le couple électromagnétique s'exprime par la dérivée partielle de l'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor [14]:

$$T_{em} = \frac{dw}{d\theta_{geom}} = p \frac{dw}{d\theta_{elect}} \quad (3.17)$$

Avec:

$$W = \frac{1}{2} ([I_s]^T [\Phi_s] + [I_r]^T [\Phi_r]) \quad (3.18)$$

Alors on peut déduire :

$$T_{em} = \frac{p}{2} [I_s]^T \left(\frac{d[Msr]}{d\theta_{elect}} \right) [I_r] \quad (3.19)$$

VI.3. Modèle de la MADA dans le repère de Park (modèle diphasé):

Après établissement du modèle électromagnétique de la machine dans le repère triphasé en tenant compte des hypothèses simplificatrices, on peut noter sa complexité, ce qui nous oblige à faire appel à des modèles plus simples dans des repères à nombre d'axes réduits permettant facilement la traduction mathématique de la machine, l'étude et l'analyse de son régime transitoire, parmi les repères les plus utilisés pour la réduction du nombre d'axes on cite « *le repère de Park* ».

Ce repère nous permet de transformer le modèle triphasé (a, b, c) à un modèle biphasé (u, v) et inversement. L'écriture du modèle de la machine asynchrone dans un repère biphasé tournant en utilisant la transformation de Park permettant la conservation de la puissance. Si l'on

appelle « θ » l'angle de rotation électrique entre l'axe « u » du repère biphasé et le repère fixe lié à la phase « a » du stator, nous avons alors :

$$\begin{bmatrix} V_u \\ V_v \end{bmatrix} = [MP(\theta)] \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Et inversement :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = [MP(\theta)]^T \begin{bmatrix} V_u \\ V_v \end{bmatrix}$$

Après développement et simplification, les tensions statoriques et rotoriques sont exprimées par l'ensemble des équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{us} = R_s i_{us} + \frac{d\Phi_{us}}{dt} - W_{\text{coor}} \Phi_{vs} \\ V_{vs} = R_s i_{vs} + \frac{d\Phi_{vs}}{dt} + W_{\text{coor}} \Phi_{us} \\ V_{ur} = R_r i_{ur} + \frac{d\Phi_{ur}}{dt} - (W_{\text{coor}} - W) \Phi_{vr} \\ V_{vr} = R_r i_{vr} + \frac{d\Phi_{vr}}{dt} + (W_{\text{coor}} - W) \Phi_{ur} \end{array} \right. \quad (3.21)$$

W_{coor} : la vitesse de rotation électrique entre l'axe « u » du repère biphasé et le repère fixe lié à la phase « a » du stator.

On peut passer du système d'axes (u, v) vers le système d'axe (d, q) en supposant la vitesse $W_{\text{coor}} = W_s$ (la vitesse du champ tournant), c'est-à-dire Le système d'axes (d, q) qui est immobile par rapport au champ tournant. On obtient alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\Phi_{ds}}{dt} - W_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\Phi_{qs}}{dt} + W_s \Phi_{ds} \\ V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\Phi_{dr}}{dt} - (W_s - W) \Phi_{qr} \end{array} \right. \quad (3.22)$$

$$V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\Phi_{qr}}{dt} + (W_s - W)\Phi_{dr}$$

L'utilisation de ce dernier système est recommandée généralement pour étudier les machines asynchrones, en particulier celles qui sont commandées par des convertisseurs de fréquence [17].

De même, on déduit les relations des flux dans ce système :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (3.23)$$

Pour les puissances de la génératrice dans le repère de Park on peut les déduire en utilisant la relation de puissance instantanée suivante :

$$P(t) = 3/2 [(V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs}) + (V_{dr} i_{dr} + V_{qr} i_{qr})] \quad (3.24)$$

En remplaçant $V_{ds}, i_{ds}, V_{qs}, i_{qs}, V_{dr}, i_{dr}, V_{qr}, i_{qr}$ par leurs expressions on obtient :

$$P(t) = P_{js}(t) + P_{jr}(t) + P_{mgs}(t) + P_{mgr}(t) + P_{em}(t) \quad (3.25)$$

Avec :

$P_{js} = \frac{3}{2} [R_s (i_{ds}^2 + i_{qs}^2)]$: la puissance dissipée en pertes Joule dans les enroulements du stator.

$P_{jr} = \frac{3}{2} [R_r (i_{dr}^2 + i_{qr}^2)]$: la puissance dissipée en pertes Joule dans les enroulements du rotor.

$P_{mgs} = \frac{3}{2} [\dot{\Omega}_{ds} i_{ds} + \dot{\Omega}_{qs} i_{qs}]$: l'échange d'énergie électromagnétique avec la source statorique.

$P_{mgr} = \frac{3}{2} [\dot{\Omega}_{dr} i_{dr} + \dot{\Omega}_{qr} i_{qr}]$: l'échange d'énergie électromagnétique avec la source rotorique.

$P_{em} = \frac{3}{2} [-w_s \Phi_{qs} i_{ds} + w_s \Phi_{ds} i_{qs} - (w_s - w) \Phi_{qr} i_{dr} + (w_s - w) \Phi_{dr} i_{qr}]$: la puissance électromagnétique.

Cette dernière expression peut être devenir en utilisant l'ensemble d'équations des flux comme suite :

$$P_{em} = \frac{3}{2} w (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \quad (3.26)$$

Sachant que:

$$P_{em} = \Omega_e T_{em} \quad (3.27)$$

$$\Omega_e = w p \quad (3.28)$$

Donc:

$$T_{em} = \frac{3}{2} p (\Phi_{ds} i_{qs} - \Phi_{qs} i_{ds}) \quad (3.29)$$

Les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques sont exprimées par :

$$\text{Puissances statoriques: } \begin{cases} P_s = \frac{3}{2} (V_{ds} i_{ds} + V_{qs} i_{qs}) \\ Q_s = \frac{3}{2} (V_{qs} i_{ds} - V_{ds} i_{qs}) \end{cases} \quad (3.30)$$

$$\text{Puissances rotoriques: } \begin{cases} P_r = \frac{3}{2} (V_{dr} i_{dr} + V_{qr} i_{qr}) \\ Q_r = \frac{3}{2} (V_{qr} i_{dr} - V_{dr} i_{qr}) \end{cases} \quad (3.31)$$

La commande adaptative

La plupart des processus réel sont non linéaires et non stationnaires. On peut citer comme exemple la saturation magnétique, l'évolution des résistances électriques avec la température... En plus de ces perturbations internes on peut ajouter aussi les perturbations externe qui sont très variable dans le temps ce qui mène à affecter le comportement du système.

Pour commander un tel système, tenant compte aux ces problèmes, la connaissance du processus devient une étape très indispensable où l'identification des paramètres du modèle joue ce rôle. Toute commande donc est conçue à partir d'un modèle idéalisé et simplifié d'un système réel qui peut être méconnu, mal identifié, en outre non linéaire et non stationnaire [18].

La commande doit non seulement imposer la réponse du procédé, mais également maintenir son comportement face aux dérives des paramètres physiques, aux perturbations externes et cela, en dépit des imperfections du modèle [18].

Dans ce chapitre on va énumérer différents types de commande dédiée au ce genre de processus (système dynamique), et on va choisir une de ces commande en illustrant son principe générale et en détaillant ces différents techniques.

I. Concept des étapes à suivre pour la commande :

Le concept d'un contrôleur qui peut changer ou modifier le discipline et la réponse d'un système pour atteindre des performances désirées, peut être un problème ennui et défi dans nombreuses application de commande.

L'objectif de la conception de la commande est de choisir les entrées de telle façon que certaines sorties atteindront les performances désirées. Soit le système à commander suivant :

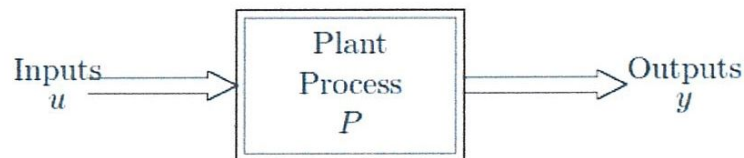


Figure (17) : représentation du système.

Les étapes à suivre pour établir une commande sont :

- Modéliser le système.
- La synthèse du contrôleur.

- Implémentation.

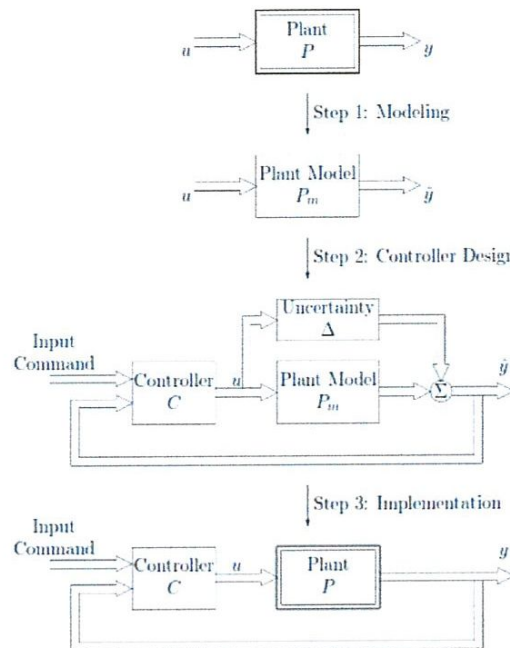


Figure (18) : les étapes à suivre pour établir une commande.

II. Différents types de commande :

L'objectif de ce paragraphe est de donner une vue d'ensemble des commandes souvent utilisées pour la commande des machines électriques. Il ne s'agit pas là d'une description exhaustive ou d'un classement, d'autant qu'on se limite aux commandes les plus utilisées en électrotechnique.

IV.1. Commande par mode glissant :

Le principe de cette commande est illustré dans la figure suivante :

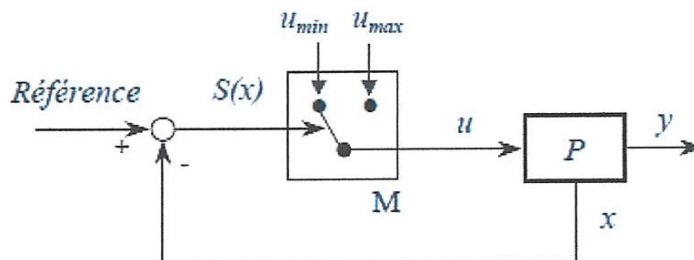


Figure (19) : principe de la commande par mode glissant.

Dans cette commande la sortie du contrôleur (u) est discrète, où le niveau (u_{min}, u_{max}) à

l'entrée du processus est en fonction du signe de la fonction de commutation $S(x)$. Cette fonction dépend d'un état du processus et, dans la plupart des cas, elle correspond à un polynôme de 1^{er} ou 2^{ème} ordre [18].

IV.2. Commande multi-algorithmique :

Elle est moins utilisée par rapport aux autres commandes. Dans cette commande on comprend la commutation d'un algorithme de commande vers un autre, le passage entre les différents algorithmes est supervisé par une logique de commande. Par exemple, un estimateur est utilisé en base fréquence pour la reconstruction du flux rotorique de la machine asynchrone, et un autre est utilisé en haute fréquence. Ce passage est géré par un correcteur PI. Mais y a d'autres logiques de supervision peuvent être utilisés comme la logique floue, les réseaux neuronaux en optimisation [18].

IV.3. Commandes à modèle :

Les deux précédentes commandes sont de type retour d'état, elles sont considérées robuste par rapport la stabilité du système, mais pas par rapport les variations paramétriques. « *Les commandes à modèle* » sont des commandes qui déterminent le réglage du processus en utilisant un modèle (plus ou moins explicite) dans leurs algorithmes, ce type de commande est robuste face à la variation des paramétriques. On peut énumérer : « les reconSTRUCTEURS d'état, la commande à modèle interne, la commande adaptative ». Ces commandes sont très utilisées dans le domaine de la commande des machines électrique.

Dans la suite de ce chapitre on va définir le dernier type de ces différents types dans lequel est « *la commande adaptative* », en détaillant ces différents techniques d'adaptation.

III. Commande adaptative

La recherche dans le domaine de la commande adaptative a une grande histoire d'activités intensives qui engendre des débats concernant la définition précise de la commande adaptative, les exemples de l'instabilité, les épreuves de la stabilité et de la robustesse, et les applications.

Depuis les années 1950 jusqu'aux 1990, la commande adaptative a connue des progrès massifs. En commençant par les années 1950, où le modèle de la commande adaptative a été

proposé par Whistaker pour résoudre le problème de l'autopilote d'un avion, ce modèle été incompréhensif et il a eu de manque de preuves de stabilité. Dans les années 1990, les recherches sur la commande adaptative sont basées sur la performance des propriétés et sur la généralisation des résultats obtenus dans les années 1980 sur certaines classes des systèmes non linéaires ont des paramètres inconnus.

Dans toutes les langues, la définition du verbe « *s'adapter* » : est de changer un comportement pour se conformer aux nouvelles circonstances. Donc, un contrôleur adaptatif est tout un contrôleur peut changer son comportement face à des changements dans la dynamique du processus et aux caractères des perturbations [19].

On peut donc distinguer deux types de perturbations qui affectent le comportement d'un système dynamique :

- Perturbation paramétriques agissant sur les performances du système de commande.
- Perturbations agissant sur les variables à réguler, ce type de perturbation est initialement réduit/éliminer en utilisant une commande conventionnelle à contre réaction.

la commande adaptative est un ensemble de techniques utilisées pour l'ajustement automatique, en ligne et en temps réel, des régulateurs des boucles de commande afin de réaliser ou maintenir un certain niveau de performances quand les paramètres du procédé à commander sont soit inconnus, soit / et varient dans le temps [Landau 86].

- **Pourquoi la commande adaptative :**

Les perturbations paramétriques rassemblent les variations de dynamiques, de gain statique, de retard. Un régulateur à paramètres fixes n'étant pas conçu pour prendre en compte ce type de perturbations, les performances en boucle fermée s'en trouvent alors affectées et dégradées. C'est à ce niveau qu'intervient la boucle d'adaptation, pour permettre de maintenir les performances désirées en présence de perturbations paramétriques [21].

III.1. Le principe général d'un système de commande adaptative :

Le principe général d'un système de commande adaptative est représenté par deux boucles (Figure 20): une boucle classique à contre réaction comportant le procédé et le régulateur à paramètres ajustables, la seconde boucle permet d'adapter en ligne les paramètres

du régulateur, en fonction d'un certain indice de performance (I.P). Cet indice de performance est évalué par l'observation des données d'entrée et de sortie du procédé, pour être ensuite comparé à l'indice de performance désiré (Pd). L'écart entre l'I.P désiré et l'I.P évalué sera 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 [21].

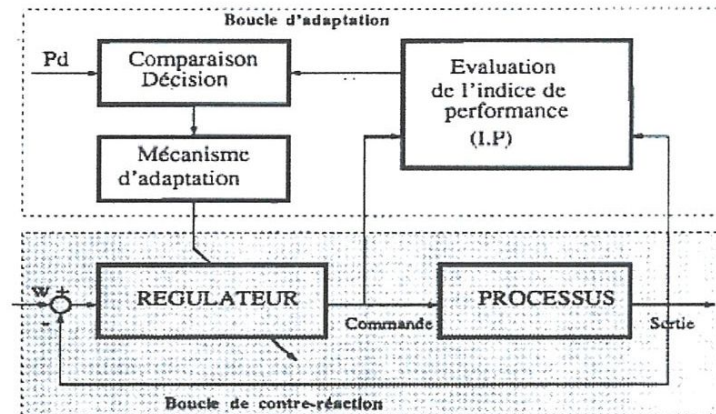


Figure (20) : Principe général d'un système de commande adaptative.

IV. Différentes techniques de commande adaptative :

Il existe différents types de schémas de systèmes adaptatifs, qui se différencient par le choix fait pour les différents blocs (régulateur et Evaluation-comparaison-adaptation) composant le principe général donné sur la (Figure 20). On distingue :

- Commande adaptative direct (ou implicite) : dans ce cas les paramètres du régulateur sont ajustés directement, on cite « *la commande avec modèle de référence* ».
- Commande adaptative indirect (ou explicite) : dans ce cas les paramètres du régulateur sont ajustés indirectement, et on cite « *la commande auto-ajustable* »

IV.1. Commande adaptative avec modèle de référence (MRAC):

Ce type de commande a été proposé pour résoudre des problèmes dans lesquels les

spécifications de performance sont données sous forme un modèle de référence. Ce modèle détermine comment la sortie du processus doit être idéalement répondre à un signal de commande [19]. Le schéma block de cette commande est illustré dans la figure suivante :

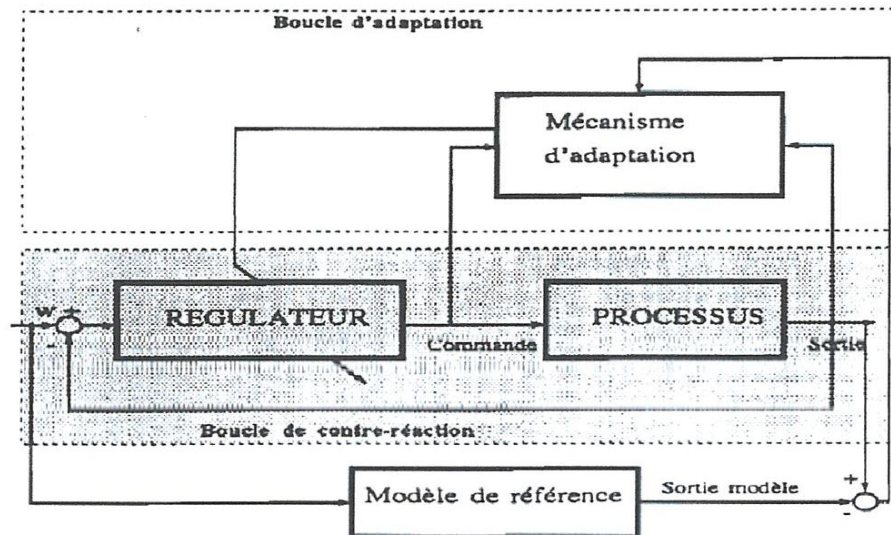


Figure (21) :schéma block de la Commande adaptative à modèle de référence.

On remarque bien que le schéma comprend deux boucles. Une boucle interne « *boucle ordinaire* » composée du régulateur et le processus, et une boucle externe « *boucle d'adaptation* » qui ajuste les paramètres du régulateur d'une manière à minimiser/annuler l'erreur entre la sortie du processus y et la sortie du modèle y_m . Le problème de la MRAC est de déterminer le mécanisme d'ajustement, qui annule l'erreur, pour atteindre la stabilité du système. Un paramètre est utilisé dans la MRAC originale [19], telle que:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\gamma e \frac{\partial e}{\partial \theta} \quad (4.1)$$

Où : e : l'erreur entre y et y_m .

θ :le paramètre du régulateur.

$\frac{\partial e}{\partial \theta}$: sensibilité dérivative de l'erreur par rapport au paramètre θ .

γ : détermine le pourcentage d'adaptation.

En pratique, il est nécessaire de faire des approximations pour obtenir la sensibilité

dérivée.

IV.2. commande auto-ajustable (STR : self-tuning regulator) :

Comme la précédente, cette commande comprend deux boucles « *boucle interne* et *boucle externe* ». Les paramètres du contrôleur sont ajustés par la boucle externe qui est composée d'un estimateur récursif et d'une synthèse du régulateur (voir la Figure (22)) :

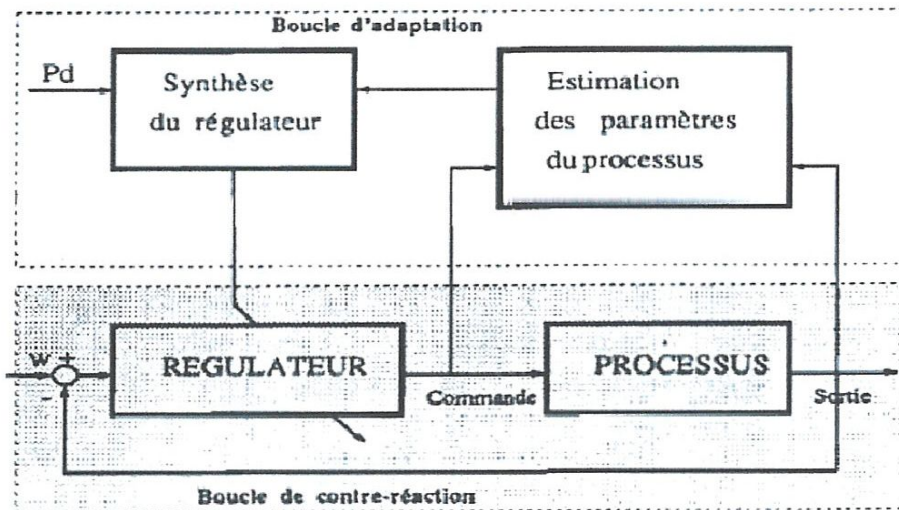


Figure (22) : Commande auto-ajustable.

Notant que le système peut être vu comme une modélisation et synthèse du régulateur automatiques, où le modèle du processus et la synthèse du régulateur sont mises à jours dans chaque période d'échantillonnage. Le contrôleur de cette construction est appelé « *régulateur auto-ajustable* » pour confirmer que le contrôleur ajuste automatiquement ces paramètres pour obtenir les propriétés désirées de la boucle fermée du système [19].

La commande auto-ajustable est issue du raisonnement suivant: si le modèle du processus à commander était parfaitement connu, nous serions en présence d'un problème de commande classique; le modèle étant inconnu, on décide d'identifier les paramètres du système et d'utiliser, à chaque instant, ces estimés (comme s'il s'agissait des vrais paramètres) dans le calcul de la loi de commande. D'une certaine manière, on peut dire que l'on commande à chaque instant, le modèle estimé du système. Cette manière de procéder est connue dans la littérature sous le nom de principe d'équivalence certaine [21].

Ainsi, l'algorithme de commande adaptative est composé d'un algorithme d'identification des paramètres du modèle du processus et d'un algorithme de calcul de la loi de commande. Le principe d'équivalence certaine permet de séparer les tâches de la commande et de l'estimation

du modèle du procédé. La synthèse de l'algorithme d'estimation paramétrique fait donc indépendamment de la méthode de commande choisie, pourvu que les modèles utilisés par les deux tâches soient compatibles. Ce schéma de commande est couramment utilisé lorsque les caractéristiques du processus sont inconnues, et varient éventuellement avec le temps et avec les conditions opératoires.

Remarque : La méthode indirecte nécessite un volume de calcul plus important, mais son domaine d'application est beaucoup plus large, d'autre part elle a fait l'objet de davantage de recherche que la méthode directe (MRAC). Celle-ci est en fait limitée à quelques applications spécifiques, du fait de la rigidité des propriétés que doivent satisfaire les modèles des procédés

On distingue plusieurs types de régulateur auto-ajustable, on cite par exemple :

- régulateur auto-ajustable à variance minimale.
- Régulateur auto-ajustable PID/A à placement de pôles.
- Placement de pôles auto-ajustable : qui l'on va détailler dans le chapitre suivant.

V. Domaine d'utilisation de la commande adaptative :

L'utilisation des systèmes de commande adaptative connaît aujourd'hui un essor certain d'une part à cause de leur complexité raisonnable et d'autre part à cause du développement de micro-processeurs pouvant servir de support pour leur mise en œuvre.

Actuellement, les techniques de commande adaptative ont été utilisées avec succès pour un grand nombre d'applications dont une liste non-exhaustive est donnée ci-dessous:

- Asservissement à moteurs électriques.
- Pilotage automatique.
- Systèmes énergétiques
- Régulation de pH.
- Systèmes hydrauliques.
- Réacteurs chimiques.
- Robots manipulateurs.
- Colonnes à distiller.

- Cimenterie.
- Procédés biotechnologiques.

On note que l'utilisation des systèmes adaptatifs repose sur deux conditions :

- Quand c'est techniquement nécessaire.
- Quand c'est économiquement rentable.

Concernant la rentabilité, les éléments suivant sont à prendre en compte :

- Amélioration de la qualité de production.
- Augmentation de la production.
- Economie d'énergie.
- Détection précoce des anomalies.
- Argument de vente.

Espacement des arrêts d'entretien.

Application : commande adaptative

d'une éolienne entraînant

Une machine asynchrone

A double alimentation

Dans ce chapitre on va appliquer une commande adaptative basée sur un régulateur RST avec placement de pôles. Mais avant de commencer on doit définir quelques éléments nécessaires utilisés dans ce chapitre comme : « l'identification, régulateur RST, régulateur RST auto-ajustable ». Après, on va appliquer la commande adaptative sur une seule phase de la génératrice asynchrone à double alimentation « *GADA ou DFIG* ».

I. Notion d'identification :

Identifier un système dynamique réel (appelé objet) c'est caractériser un autre système (appelé modèle), à partir de la connaissance expérimentale des entrées et sorties de manière à obtenir le même comportement. Le modèle peut être un système physique, ou bien un système abstrait (modèle mathématique, système d'équations algébriques ou différentielles).

En pratique, l'identification a généralement pour objectif de déterminer un modèle de conduite utilisable pour la simulation, la commande ou réglage d'un processus. La bonne identification d'un système donné nécessite la connaissance de son fonctionnement, ainsi que toute action extérieure agissant sur lui.

II. Différents types d'identification :

L'identification d'un procédé vise à fournir le comportement d'un système sans son mécanisme de contrôle, on distingue deux types principaux d'identification :

- Identification paramétrique off-line.
- Identification paramétrique on-line (en temps réel).

II.1 Identification off-line (moindre carrée ordinaire) (voir annexe 2):

Soit le système du 1^{ier} ordre suivant :

$$Y(k) + a_1 y(k-1) = b_1 u(k-1) \quad (5.1)$$

Avec $y(-1)$: condition initial.

Le système (5.1) est excité par une séquence d'entrée : $u(-1), u(0), u(1), \dots$
et la sortie est une séquence : $y(0), y(1), \dots$

le problème de l'identification revient à estimer les paramètres « a_1, b_1 » pour une séquence d'entrée « $u(-1), u(0), u(1)...$ » et une séquence de sortie « $y(0), y(1)...$ », pour résoudre ce problème, nous commençons par écrire l'équation (5.1) pour (N+1) mesures pour $K=0, \dots, N$.

On arrive au système algébrique suivant :

$$\begin{aligned}
 Y(0) + a_1 y(-1) &= b_1 u(-1) & (5.2) \\
 Y(1) + a_1 y(0) &= b_1 u(0) \\
 Y(2) + a_1 y(1) &= b_1 u(1) \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 Y(N) + a_1 y(N-1) &= b_1 u(N-1) & (5.3)
 \end{aligned}$$

Les équations (5.3) sont utilisées pour l'estimation des paramètres a_1, b_1 . Et l'équation (5.2) est utilisée pour définir la valeur initial $y(-1)$. Alors on met :

$$\theta = \begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(N) \end{bmatrix}, \Phi = \begin{bmatrix} \Phi^T(0) \\ \Phi^T(1) \\ \vdots \\ \Phi^T(N-1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -y(0) & u(0) \\ -y(1) & u(1) \\ \vdots & \vdots \\ -y(N-1) & u(N-1) \end{bmatrix}$$

θ : vecteur des paramètres.

y : vecteur des sorties.

Φ : vecteur des observations.

On peut écrire l'ensemble d'équations (5.3) sous la forme :

$$Y = \Phi \theta \tag{5.4}$$

L'équation (5.4) est un système algébrique de N équations avec deux inconnus.

Si l'entrée ou la sortie possède une erreur aux mesures ou aux bruits, l'équation (5.4) devient :

$$Y = \Phi \theta + e \tag{5.5}$$

$$e = Y - \Phi \theta \tag{5.6}$$

Tel que e est le vecteur des erreurs de N dimensions:

$$\mathbf{e}^T = [e(1) \ e(2) \ \dots \ e(N)] \quad (5.7)$$

La méthode des moindres carrés repose sur le principe de la minimisation du critère suivant :

$$J = \mathbf{e}^T \mathbf{e} = \sum_{k=1}^N e^2(k) \quad (5.8)$$

On remplace (5.6) dans (5.8) :

$$J = (\mathbf{Y} - \Phi\theta)^T (\mathbf{Y} - \Phi\theta) \quad (5.9)$$

Maintenant on calcule :

$$\frac{dJ}{d\theta} = -2\Phi^T (\mathbf{Y} - \Phi\theta) \quad (5.10)$$

Pour qu'on obtienne la valeur minimale du critère « J » l'équation (5.10) doit être égale à zéro, on obtient donc :

$$\Phi^T \Phi \theta = \Phi^T \mathbf{Y} \quad (5.11)$$

Donc le vecteur des paramètres à estimer est :

$$\theta = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T \mathbf{Y} \quad (5.12)$$

Pour que l'équation (5.12) soit résolue la matrice « $(\Phi^T \Phi)^{-1}$ » doit être réversible.

II.2 Identification paramétrique en temps réel (on-line) (voir annexe 3):

Dans les systèmes dynamiques où ses paramètres se changent et varient dans le temps, l'identification doit être effectuée à chaque période d'échantillonnage c'est l'identification « *en temps réel* ». Pour qu'on puisse estimer et suivre les paramètres de ce système l'identification doit être récursive. Parmi ces types d'identification on cite « *la méthode de moindre carrée récursive (RLS : recursive least square)* », cette méthode est la plus utilisée car elle est simple à mettre en œuvre. Pour cette méthode le modèle suivant est utilisé :

$$Y(Z^{-1}) = Z^{-d} \frac{B(Z^{-1})}{A(Z^{-1})} u(Z^{-1}) + \frac{C(Z^{-1})}{A(Z^{-1})} e(Z^{-1}) \quad (5.13)$$

Où : d : le retard.

$$C(Z^{-1}) = 1.$$

$$\mathbf{A}(Z^{-1}) = 1 + a_1 Z^{-1} + \dots + a_{na} Z^{-n}$$

$$\mathbf{B}(Z^{-1}) = b_1 Z^{-1} + \dots + b_{nb} Z^{-n}$$

La question posée est : comment, après une nouvelle mesure $y(k+1)$, obtenir le nouveau vecteur « θ_{k+1} » connaissant le vecteur « θ_k » calculé à partir des « k » mesures précédentes ?

On a :

$$\theta_k = (\Phi_k^T \Phi_k)^{-1} \Phi_k^T Y_k \tag{5.14}$$

L'acquisition d'une mesure supplémentaire « Y_{k+1} » conduit à rajouter la ligne « Φ_{k+1} » à la matrice « Φ_k » et un élément au vecteur colonne « Y_k » :

$$\Phi_{k+1} = \begin{bmatrix} \Phi_k \\ \Phi_{k+1}^T \end{bmatrix} \text{ et } Y_{k+1} = \begin{bmatrix} Y_k \\ Y_{k+1} \end{bmatrix} \tag{5.15}$$

Avec :

$$\theta_{k+1} = (\Phi_{k+1}^T \Phi_{k+1})^{-1} \Phi_{k+1}^T Y_{k+1} \tag{5.16}$$

On obtient :

$$\theta_{k+1} = [(\Phi_k^T \Phi_k) + \Phi_{k+1}^T \Phi_{k+1}]^{-1} [\Phi_k^T Y_k + \Phi_{k+1}^T Y_{k+1}] \tag{5.17}$$

L'idée de la récurrence est de faire apparaître dans (5.17) une relation entre « θ_{k+1} » et « θ_k ». Après quelques manipulations de matrice, on obtient les résultats suivants :

$$\theta_{k+1} = \theta_k + P_{k+1} \Phi_{k+1}^T [Y_{k+1} - (\Phi_{k+1}^T \theta_k)] \tag{5.18}$$

Avec :

$$P_{k+1} = P_k - \frac{P_k \Phi_{k+1}^T \Phi_{k+1} P_k}{\Phi_{k+1}^T P_k \Phi_{k+1} + 1} \tag{5.19}$$

P_{k+1} : matrice du gain d'adaptation.

En examinant l'algorithme de la méthode des moindres carrés, on peut constater que la trace de la matrice du gain d'adaptation est décroissante. Cette décroissance se traduit par une

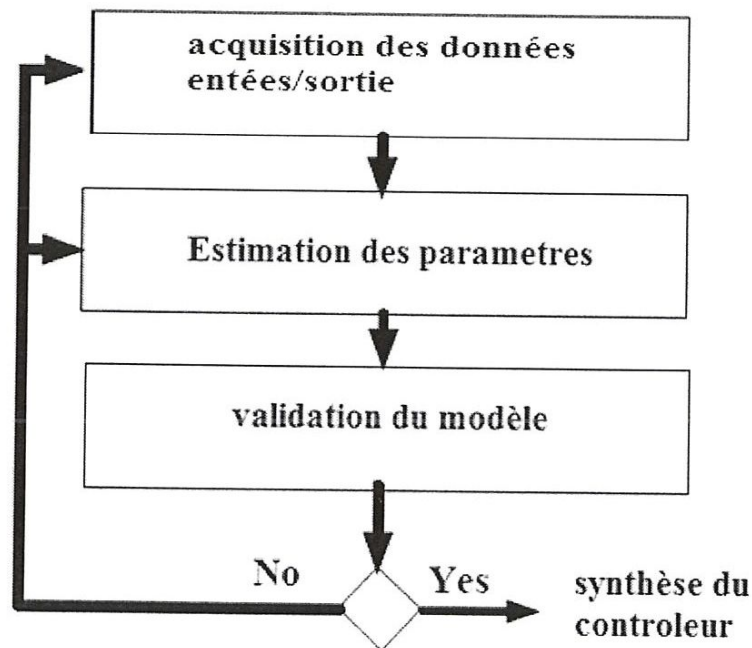
ignorance progressive des nouvelles observations. A la lumière de cette remarque, on peut conclure que cette approche convient bien pour l'identification d'un procédé stationnaire.

Pour l'identification des procédés à paramètres variables dans le temps, on doit donner plus de poids aux nouvelles observations et ignorer progressivement les anciennes informations.

D'où l'idée d'introduire dans le critère quadratique un facteur d'oubli « λ » qui caractérise l'oubli progressif des mesures les plus anciennes.

Généralement on prend : $0.955 \leq \lambda \leq 0.99$, la méthode est dite « *la méthode des moindres carrés pondérées* ». dans ce cas l'équation (18.5) ne se change pas, mais (19.5) devient :

$$P_{k+1} = \frac{1}{\lambda} \left[P_k - \frac{P_k \Phi_{k+1} \Phi_{k+1}^T P_k}{\Phi_{k+1}^T P_k \Phi_{k+1} + 1} \right] \quad (5.20)$$



Organigramme de l'identification paramétrique.

III. Le régulateur RST :

Un régulateur RST, dont le nom reflète les trois polynômes en « z » qu'il fait intervenir, est un algorithme plus sophistiqué exploitant à fond les ressources numériques dont on dispose et dont la synthèse est purement algébrique.

Le principe général d'un régulateur RST est illustré dans la figure suivante :

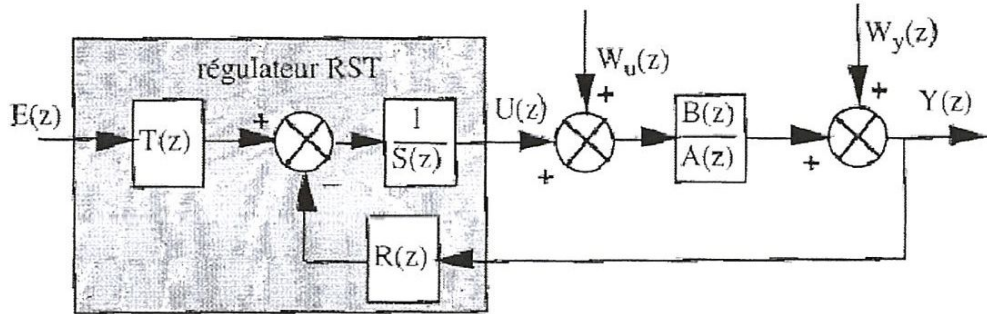


Figure (23) : Principe d'un correcteur RST. $W_u(z)$ est une perturbation de charge, $W_y(z)$ est une perturbation de sortie.

La forme générale de la loi de commande d'un correcteur de type RST est :

$$S(z)U(z) = T(z) E(z) - R(z)Y(z) \tag{5.21}$$

donc :

$$U(z) = \frac{T(z)}{S(z)}E(z) - \frac{R(z)}{S(z)}Y(z) \tag{5.22}$$

La sortie du système bouclée est donnée par :

$$Y(z) = \frac{B(z)}{A(z)}U(z) + \frac{B(z)}{A(z)}W_u(z) + W_y(z) \tag{5.23}$$

Afin d'alléger les notations, les arguments des polynômes ne seront plus notés.

En réécrivant (5.21) et (5.22) :

$$S U(z) = T E(z) - R Y(z) \tag{5.24}$$

$$A Y(z) = B U(z) + B W_u(z) + A W_y(z) \tag{5.25}$$

Explicitons $U(z)$:

$$AS U(z) = AT E(z) - AR Y(z)$$

$$AS U(z) = AT E(z) - BR U(z) - BR W_u(z) - AR W_y(z)$$

$$(AS + BR) U(z) = AT E(z) - BR W_u(z) - AR W_y(z)$$

$$U(z) = \frac{A T}{A S + B R} E(z) - \frac{B R}{A S + B R} W_u(z) - \frac{A R}{A S + B R} W_y(z) \quad (5.26)$$

Et $y(z)$:

$$A S Y(z) = B S U(z) + B S W_u(z) + A S W_y(z) - A R Y(z)$$

$$A S Y(z) = B T E(z) - B R Y(z) + B S W_u(z) + A S W_y(z)$$

$$(A S + B R) Y(z) = B T E(z) + B S W_u(z) + A S W_y(z)$$

$$Y(z) = \frac{B T}{A S + B R} E(z) - \frac{B S}{A S + B R} W_u(z) - \frac{A S}{A S + B R} W_y(z) \quad (5.27)$$

La consigne étant constante, on peut ne s'intéresser qu'aux termes de $Y(z)$ dépendant des perturbations :

$$Y(z) = \frac{B S}{A S + B R} W_u(z) \quad (5.28)$$

Et :

$$Y(z) = \frac{A S}{A S + B R} W_u(z) \quad (5.29)$$

III.1 SYNTHÈSE DU RÉGULATEUR RST :

III.1.1 Principe :

L'ensemble du processus, compensé par le régulateur RST, a pour fonction de transfert en boucle fermée la forme :

$$\frac{Y(z)}{E(z)} = \frac{B(z) T(z)}{A(z) S(z) + B(z) R(z)} \quad (5.30)$$

Les trois polynômes $R(z)$, $S(z)$ et $T(z)$ doivent être choisis et dimensionnés afin que cette fonction de transfert en boucle fermée réponde à un **modèle de référence**, ou **modèle à poursuivre**, imposé par l'utilisateur (voire la figure ci-dessous) :

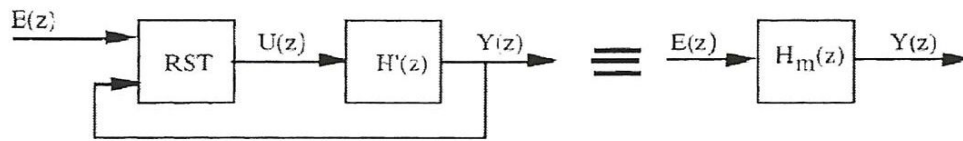


Figure (24) : principe de la régulation RST.

Tel que :

$$H_m(z) = \frac{B_m(z)}{A_m(z)} \tag{5.31}$$

Où : H_m : la fonction de transfert de référence.

A_m : dénominateur de la fonction de référence doit être choisi de telle façon le système soit stable, pour cela les ces racine doit être dans le cercle unité

On appelle le polynôme ($A(z) S(z) + B(z) R(z)$) : « *la fonction de Diophontine* » tel que :

$$A(z) S(z) + B(z) R(z) = A_m(z) \tag{5.32}$$

Alors, on cherche à trouver les valeurs des paramètres de S et R pour que la fonction de Diophontine soit égale au polynôme désiré $A_m(z)$, cette méthode s'appelle « *la méthode de placement de pôles* ».

Avec :

$$S(z) = s_{ns} + s_{ns-1} z^{ns-1} + \dots + s_0 z^{ns} .$$

$$R(z) = r_{nr} + r_{nr-1} z^{nr-1} + \dots + r_0 z^{nr} .$$

Où :

$$ns = n_B + d - 1. \text{ Où } d : \text{ le retard.}$$

$$nr = n_A - 1.$$

IV. Placement de pôles adaptative (auto-ajustable) :

Le principe de cette régulation repose sur le même que la précédente, sauf que les paramètres de a_i et b_i varient dans le temps et on doit, à chaque période d'échantillonnage, les estimer. Alors les valeurs de s_i et r_i seront luis même estimés.

$$\hat{S}(z) = \hat{s}_{ns} + \hat{s}_{ns-1} z^{ns-1} + \dots + \hat{s}_0 z^{ns}$$

$$\hat{R}(z) = \hat{r}_{nr} + \hat{r}_{nr-1} z^{nr-1} + \dots + \hat{r}_0 z^{ns}$$

Les polynômes $\hat{S}(z)$ et $\hat{R}(z)$ s'obtiennent comme solution de l'équation des Diophantine dans laquelle $A(z)$ et $B(z)$ sont remplacés par leurs estimés.

Donc la résolution de (5.33) (estimée) soit à chaque période d'échantillonnage, c'est l'idée de la résolution récursive :

$$\hat{A}(z)\hat{S}(z) + \hat{B}(z)\hat{R}(z) = A_m(z) \tag{5.33}$$

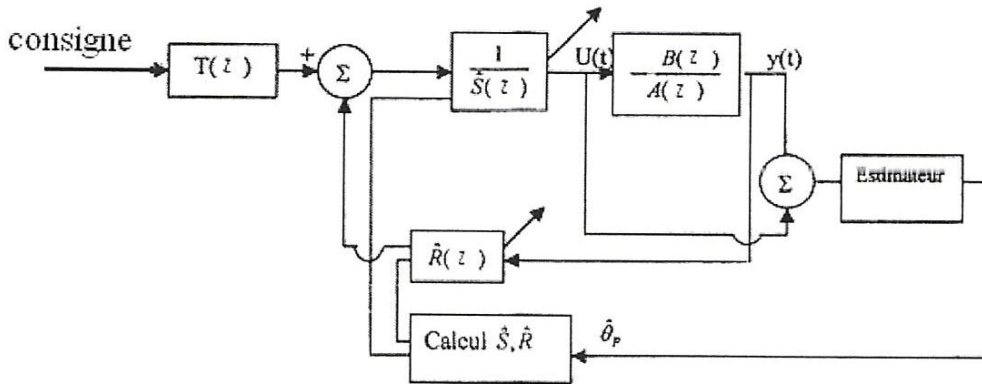
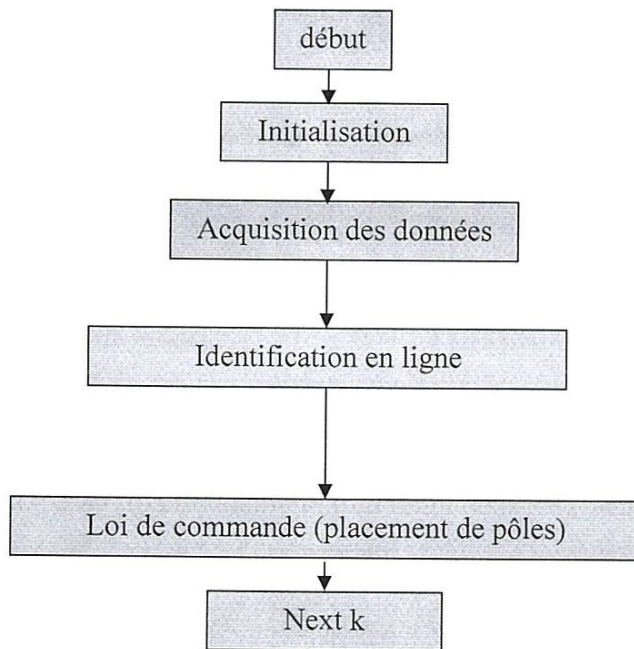


Figure (25): principe de fonctionnement d'un régulateur RST adaptatif auto-ajustable.



Organigramme d'un régulateur RST auto ajustable

V. Commande adaptative « placement de pôles » d'une éolienne entraînant une génératrice asynchrone à double alimentation :

On a vu que pour commander un système a des paramètres inconnus, on doit l'identifier et pour l'identifier, on doit le modéliser. Pour la modélisation d'une éolienne entraînant une GADA, on a utilisé l'environnement Simulink de MATLAB figure (26).

Au début on a identifié le système en considérant la vitesse du vent constante, et après on a utilisé le vecteur des paramètres estimé comme modèle équivalent du processus pour appliquer la commande adaptative.

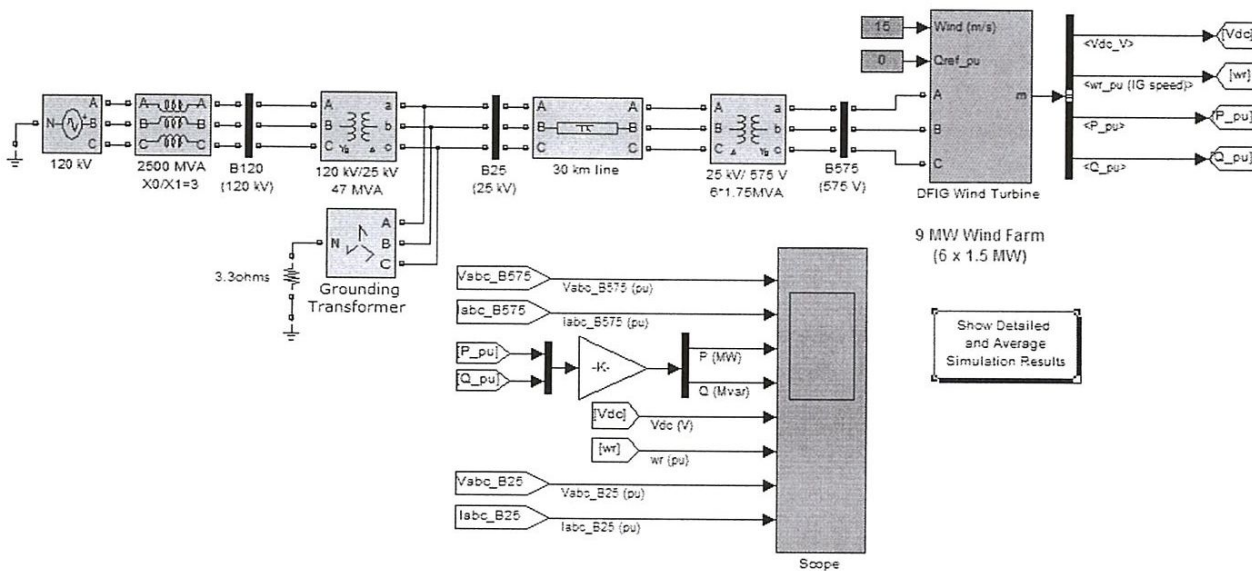


Figure (26) :modèle d'une firme d'éoliennes avec GADA (modèle global).

Pour l'identification, on a considéré que les degrés des polynômes A et B sont respectivement de 3 et on a utilisé les valeurs de la tension V comme entrée et les valeurs du courant I comme sortie.

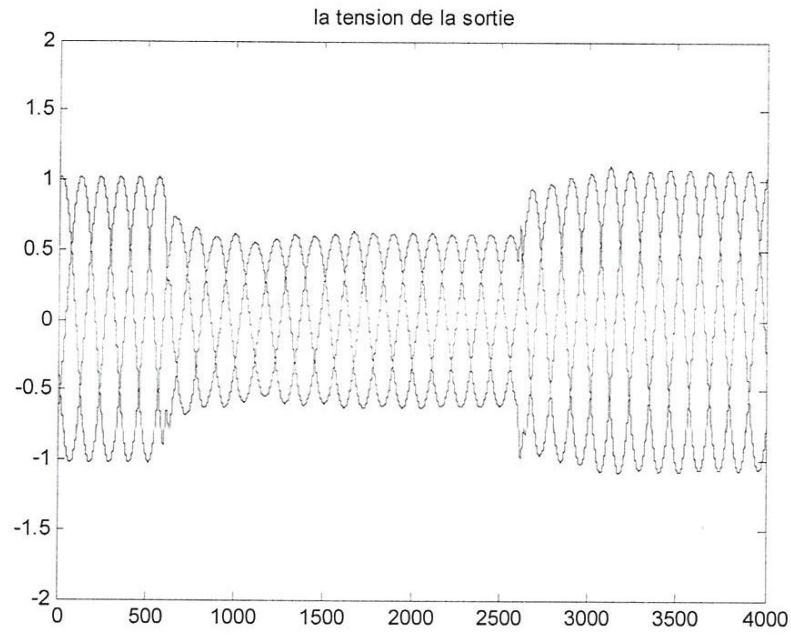


Figure (27) : la tension de la sortie de l'éolienne.

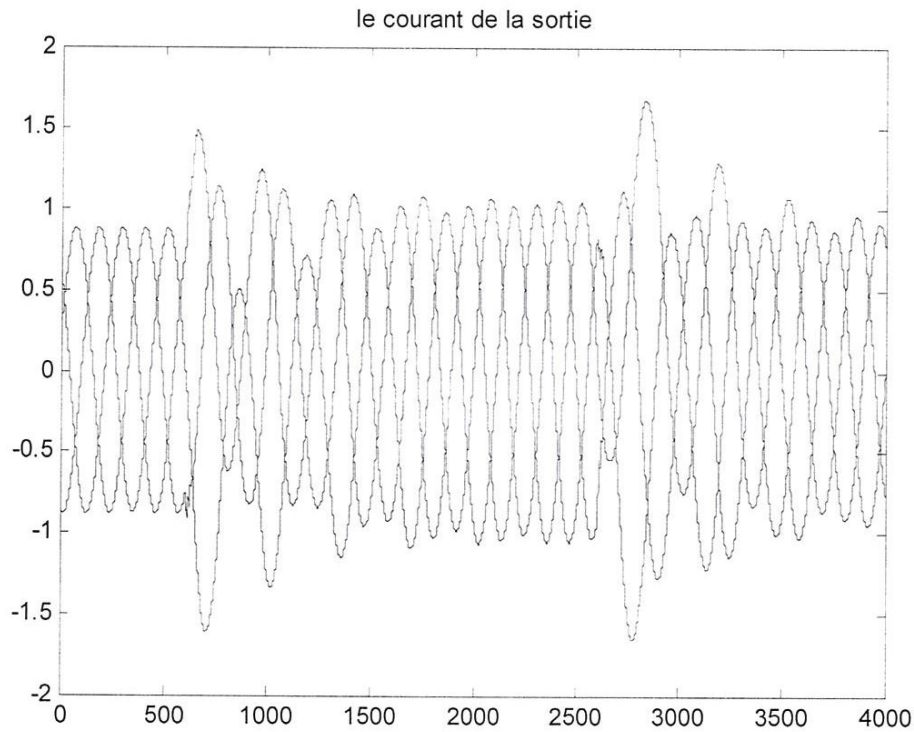


Figure (28) : le courant de la sortie.

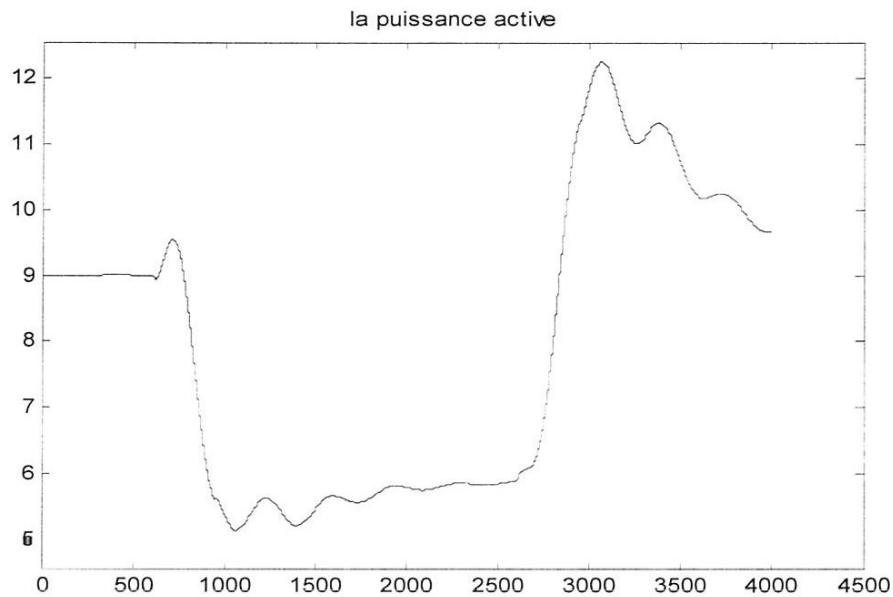


Figure (29) : la puissance active.

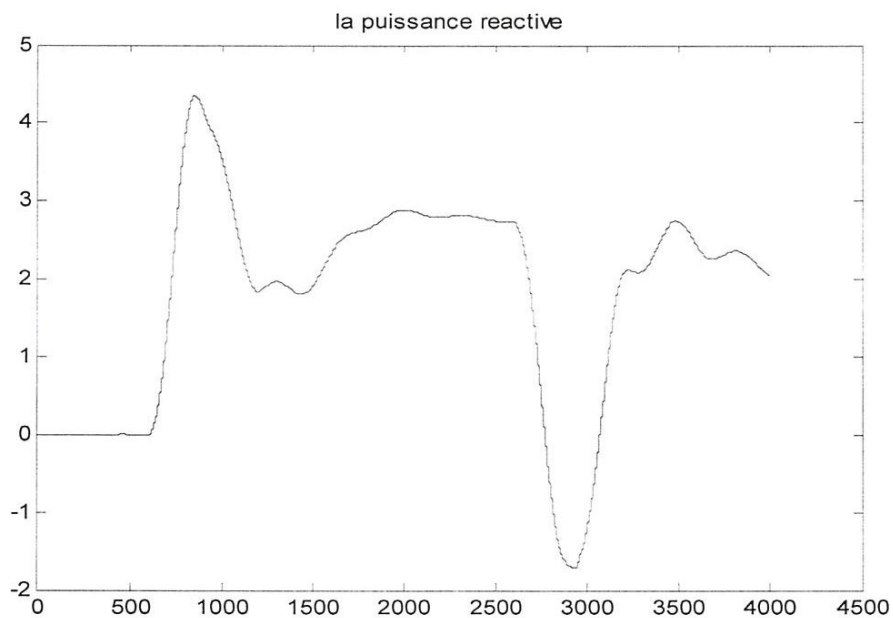


Figure (30) : la puissance réactive.

On voit bien que le système est non linéaire et il varie dans le temps, malgré le vent constant, donc la génératrice elle-même est un système non linéaire et ses paramètres varient dans le temps. Lorsque le vent varie, on est face à une non linéarité complexe dû d'une part au vent et d'autre part au fonctionnement de la génératrice.

La convergence de l'algorithme d'identification, vers les paramètres a_i et b_i du système est illustrée dans la (figure (31)).

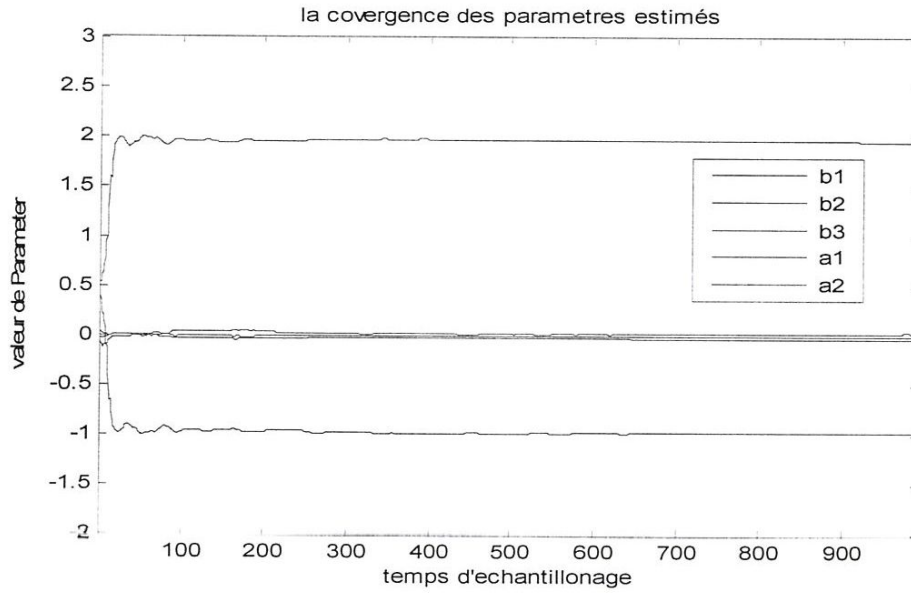


Figure (31) : Paramètres estimés du système

V.1. Effet du vent sur les performances de l'éolienne :

On sait que le vent dans la nature n'est pas stable et il varie dans le temps d'une façon aléatoire, donc on l'a considéré comme une perturbation externe. En effet, la figure (32) montre que ces variations (dans notre exemple un passage de 3000 à 2850 tr/min qui représente une variation de 5 %) provoquent une variation de la tension de pratiquement 15 % et de la fréquence d'environ 5 % délivrées par la machine.

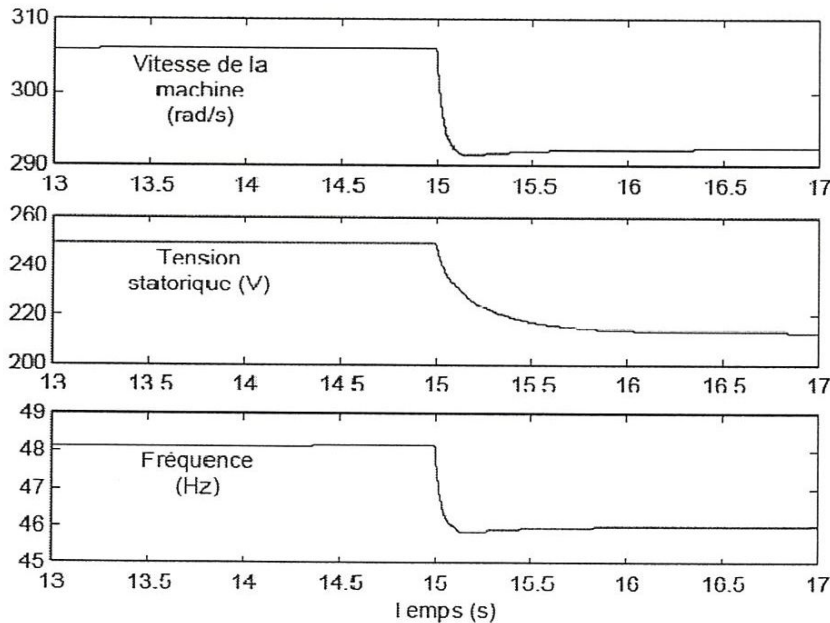


Figure (32) : Effet de la variation du vent sur les performances de l'éolienne

V.2. Implémentation de la commande adaptative (régulateur RST placement de pôles auto-ajustable) :

Dans le but de ne pas introduire de retard dans la commande et la réaction du système, on est souvent amené à prendre les polynômes R, S et T de même degré ρ . Ceci n'est réalisable que si les temps de calcul et de conversion AN et NA sont négligeables vis-à-vis de la période d'échantillonnage. Dans ce cas, où tous les polynômes ont le même degré, l'algorithme de réglage (5.24) permet d'écrire :

$$\begin{aligned} (1 + s_1 z^{-1} + \dots + s_p z^{-p}) U(z) = & (t_0 + t_1 z^{-1} + \dots + t_p z^{-p}) E(z) \\ & - (r_0 + r_1 z^{-1} + \dots + r_p z^{-p}) Y(z) \end{aligned} \quad (5.34)$$

Ce qui conduit, dans le domaine temporel, à :

$$\begin{aligned} u_k = & -s_1 u_{k-1} - \dots - s_p u_{k-p} \\ & + t_0 e_k + t_1 e_{k-1} + \dots + t_p e_{k-p} \\ & - r_0 y_k - r_1 y_{k-1} - \dots - r_p y_{k-p} \end{aligned} \quad (5.35)$$

Le code réalisant le régulateur RST se fonde directement sur la relation (5.35).

La théorie du placement de pôles robuste montre qu'en choisissant un régulateur strictement propre ($\deg(S)=\deg(R)+1$), le temps de calcul est augmenté, mais il en résulte un filtrage des bruits hautes fréquences et une aptitude à respecter le gabarit performances robustesse du côté hautes fréquences. Cela signifie que si A est de degré n, nous avons alors :

$$\deg(A_m)=2n+1, \text{ soit } \deg(S)=\deg(A)+1 \text{ et } \deg(R)=\deg(A).$$

Dans le cas de notre application, pour le modèle de conduite :

$$A(z) = a_1 z + a_0$$

$$B(z) = b_0$$

Il est choisi un polynôme caractéristique désiré :

$$A_m(z) = a_{m1}z^3 + a_{m2}z^2 + a_{m3}z + a_{m4}$$

Avec les polynômes du régulateur : $R(z) = r_1z + r_0$ et $S(z) = s_2z^2 + s_1z + s_0$

En utilisant l'algorithme d'identification récursif de *l'annexe 3* et l'algorithme de résolution de l'équation de diophantine (Identité Bezout) de *l'annexe 4*, il est effectué une simulation en boucle fermée du système en tenant compte des essais suivants :

- Le premier essai consiste à réaliser des échelons de puissance active et réactive alors que la machine est entraînée à vitesse fixe.

Conditions de l'essai :

machine entraînée à 1450 tr/min.

A $t=2$ s : échelon de puissance active (P_{ref} passe de 0 à -5000W). Et à $t=2,5$ s : échelon de puissance réactive (Q_{ref} passe de 0 à 2000 VAR)

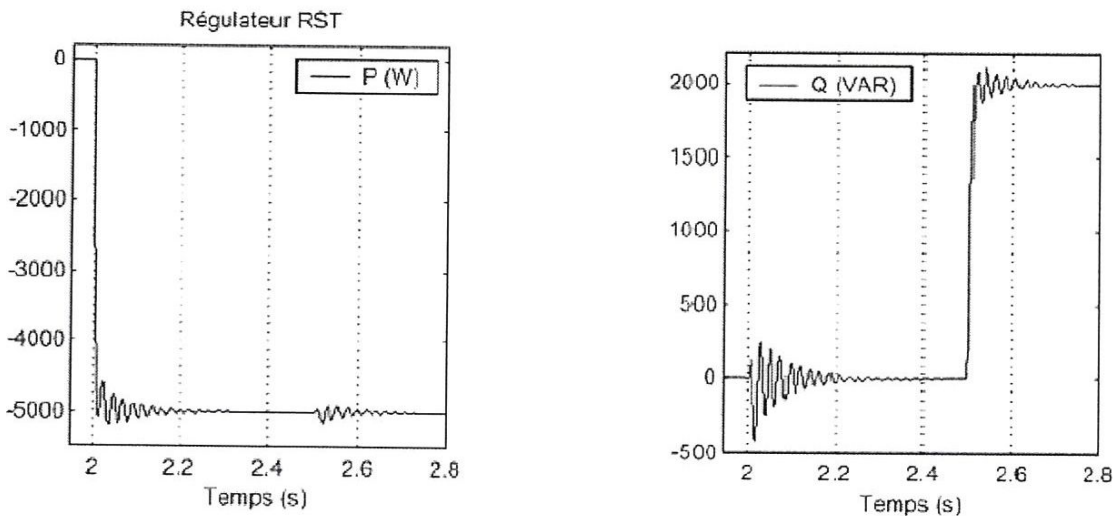


Figure (33) : Suivi de consigne de puissances active et réactive.

- **Sensibilité aux perturbations :**

Cet essai nous permet de vérifier dans quelle mesure les puissances mesurées restent à leur valeur de consigne lorsque la vitesse de rotation de la machine varie brusquement.

Conditions de l'essai :

Machine entraînée à 1350 tr/min.

Consigne de puissance active fixe de -5000 W.

Consigne de puissance réactive fixe de 2000 VAR

à $t=2$ s la vitesse passe brusquement de 1350 à 1450 tr/min.

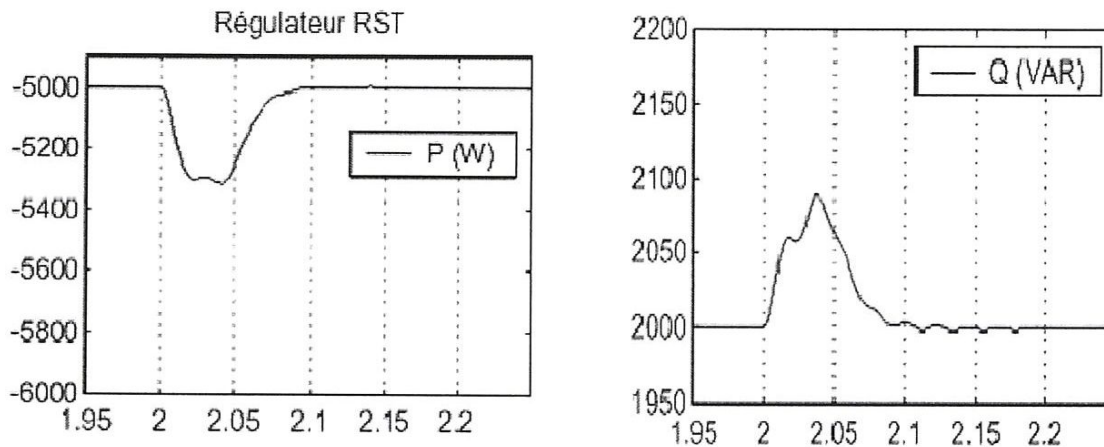


Figure (34) : Sensibilité des puissances à une brusque variation de vitesse

On peut remarquer qu'en présence de la variation brusque de la vitesse de rotation de la machine les puissances restent à leurs valeurs de consigne où la consigne de la puissance active est fixée de (-5000) et la consigne de la puissance réactive est fixée de (2000) .

V.3 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'établir la synthèse d'un régulateur adaptatif basé sur une structure RST pour la commande de la Machine Asynchrone à Double Alimentation utilisée en génératrice. Il est montré à travers les résultats de simulation les bonnes performances de la stratégie adoptée en présence de variation de la vitesse du vent et pour les variations paramétriques du système.

Conclusion générale

Dans le présent mémoire, on a effectué une étude sur la commande adaptative d'un système de production d'électricité basé une énergie renouvelable, en l'occurrence l'énergie éolienne.

Notre travail était motivé par la question comment peut-on exploiter les énergies du vent, tout en minimisant le coût économique et maximisant la puissance électrique et ce pour concurrencer les systèmes qui utilisent l'énergie fossile.

Dans ce contexte, on a au début fait un balayage des ressources de l'Algérie en énergies renouvelables tout en mettant l'accent sur l'énergie éolienne.

Et vu le caractère non linéaire et variable dans le temps des systèmes utilisés dans la production d'énergie éolienne, notre étude s'est axée sur la commande adaptative.

En effet, on a appliqué une commande adaptative basée sur un régulateur RST avec placement des pôles pour réguler le comportement de la génératrice asynchrone à double alimentation (élément clé dans l'installation éolienne).

Les résultats de simulation ont montré les bonnes performances de la stratégie de commande adoptée et ce malgré la variation des paramètres de la génératrice et la variation de la vitesse du vent.

Cependant, l'implémentation en temps réel de la stratégie de commande adoptée nécessite d'autres travaux permettant de mieux appréhender la complexité de l'installation éolienne.

Annexe 1 : la transformation d'un système continu au discret :

```
function [N_d,D_d]=cont2disc(N_c,D_c,Ts)
```

```
sys_c=tf(N_c,D_c);  
sys_d=c2d(sys_c,Ts,'zoh');
```

```
set(sys_d,'variable','z^-1');  
N_d=get(sys_d,'num');  
N_d=cat(1,N_d{:});  
D_d=get(sys_d,'den');  
D_d=cat(1,D_d{:});
```


Annexe 2 : le programme de la méthode des moindres carrés ordinaire:

```

function [B,A]=nr1s(y,u,na,nb,d);

sz=size(y);
if(sz(2)~=1), y=y';end;
sz=size(u);
if(sz(2)~=1), u=u';end;

nmax=max(na,nb+d);
ntheta=na+nb;
N=length(y)-nmax-1;

Rnny=[];
for k=2:na+1,
yp=y(k:k+N-1);
Rnny=[ypRnny];
end;
Rnnu=[];
for k=d+2:nb+d+1,
up=u(k:k+N-1);
Rnnu=[up Rnnu];
end;
y0=y(1:N);
Rnn=[RnnyRnnu];

[Q,Res]=qr(Rnn);
Y0=Q*y0;
Res1=Res(1:2*ntheta,:);
Y01=Y0(1:2*ntheta);
theta = Res\ (Res'\ (Rnn'*y0));

ther=y0 - Rnn*theta;
er=Res\ (Res'\ (Rnn'*ther));
theta=theta + er;

A=[1 theta(1:na)'];
B=[zeros(1,d) 0 theta(na+1:na+nb)'];

```

Annexe 3: le programme de la méthode des moindres carrée récurrente:

```

function [B,A]=rls(y,u,na,nb,d,Fin,lam1,lam0)

[nl,nc]=size(y);
ifnc>2, error('This routine is only for SISO systems'),end
[nl,nc]=size(u);
ifnc>2, error('This routine is only for SISO systems'),end
if (na<0 | nb<0 | d<0), error('The order of A,B and d should not be
negative!!'),end

nd=min(length(u),length(y));
nth=na+nb;

ifnd<nth, error('Number of data should be greater than the number of
parameters!'),end

np=max(na+1,nb+d);

ifnargin<5, error('This routine needs more parameters!'),end
ifnargin<6, lam1=1;lam0=1;Fin=1000;end
ifnargin<7, lam1=1;lam0=1;end
ifnargin<8, lam0=1;end

ifisempty(Fin), Fin=1000;end
ifisempty(lam1), lam1=1;end
ifisempty(lam0), lam0=1;end

if (lam1>1 | lam0>1), error('lam1 and lam0 should be less than 1');end
if (lam1<0.95 | lam0<0.95), disp ('warning :lam1 and lam0 are normally
greater than 0.95');end

theta=zeros(nth,1);
phi=zeros(2*np,1);

F=Fin*nth*eye(nth);

i=[1:np-1 np+1:2*np-1];
j=[1:na np+d+1:np+d+nb];

for t=1:nd
yhat=theta'*phi(j);
e_apri=y(t)-yhat;

```

```
e_apost=e_apri/(1+phi(j) '*F*phi(j));  
theta=theta+F*phi(j)*e_apost;
```

```
F=1/lam1*(F-(F*phi(j)*phi(j) '*F)/(lam1+phi(j) '*F*phi(j)));  
lam1=lam0*lam1+1-lam0;
```

```
phi(i+1)=phi(i);phi(1)=-y(t);phi(np+1)=u(t);
```

```
end
```

```
A=[1;theta(1:na)]';
```

```
B=[zeros(d+1,1);theta(na+1:na+nb)]';
```

Annexe 4: programme de la résolution de la fonction de Diophantine**(Bezout):**

```

function [Rp, Sp, nrp, nsp]=bezoutd(A,B,Hs,Hr,P)

PRECISION=1e-16;

D=size(A);
if D(1)>1, A=A'; end;
D=size(B);
if D(1)>1, B=B'; end;
D=size(Hs);
if D(1)>1, Hs=Hs'; end;
if D(1)==0, Hs=1; end;
D=size(Hr);
if D(1)≠1, Hr=Hr'; end;
if D(1)==0, Hr=1; end;
D=size(P);
if D(1)>1, P=P'; end;

na=length(A)-1;
nb=length(B)-1;
np=length(P)-1;
nhs=length(Hs)-1;
nhr=length(Hr)-1;

if (nhs>0), Ah=conv(A,Hs); else Ah=A*Hs; end; % Ah = A * Hs
nah=length(Ah)-1;
if (nhr>0), Bh=conv(B,Hr); else Bh=B*Hr; end;
nbh=length(Bh)-1;
if (np>nah+nbh-1), disp('Bezout error: too many poles');end;

if (np<nah+nbh-1),
rootsPdes=roots(P);
nextra=nah+nbh-1-np;
rmin=1e-16;
angle=[0:nextra-1]'/nextra*2*pi;
j=sqrt(-1);
rootsPextra=rmin*exp(j*angle);
P=poly([rootsPdes;rootsPextra]);
np=nah+nbh-1;
end;
P,

nsp=nbh-1;
nrp=nah-1;

if (np>nah+nbh-1),
disp('Order of model denominator is too low! Add a polynom of higher order
to Hs or Hr. ');
end;

M=[];
for j=1:nsp+1,
V=[];
if (j>1), V=[V ; zeros(j-1,1)]; end;% zeros in front of Ah

```

```

V=[V ; Ah'];% Ah
if (j<=nsp), V=[V ; zeros(nsp+1-j,1)]; end;% zeros behind Ah
if (length(V)~=nah+nbh), disp('bezoutb: error V'); end;
    M=[M V];
end;

for j=1:nrp+1,
    V=[];
if (j>1), V=[V ; zeros(j-1,1)]; end;
    V=[V ; Bh'];
if (j<=nrp), V=[V ; zeros(nrp+1-j,1)]; end;
if (length(V)~=nah+nbh), disp('bezoutb: error V'); end;
M=[M V];
end;

D=size(M);
if (D(1)~=nah+nbh), disp('bezoutb: error size M row'); end;
if (D(2)~=nah+nbh), disp('bezoutb: error size M column'); end;

P=P';

global M1;
M1=M;

X= M\P;
X=real(X);

X=X';
Sp=X(1:nsp+1);
Rp=X(nsp+2:nsp+nrp+2);

```

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] SoltaneBelakehal, « conception et commande des machines à aimant permanent dédiées aux énergies renouvelable », thèse de doctorat de l'université de constantine, 2010.
- [2] : Eduardo F.Camacho .Francisco R. Rubio Manuel Berenguel. Diego Martínez, "Control of Solar Energy Systems", edition springer.
- [3] : Angel Cid Pastor, "conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques", thèse de doctorat de l'institut nationale des sciences appliquées de Toulouse, 2006.
- [4] : Anne Maczulak, « renewable energy sources and methods », edition green technolohie.
- [5] : Recherche ECRIN entreprise, " L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables", rapport de synthèse, mai 2002.
- [6] : Miguel Lopez, « contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolienne pour une unité de production isolée », thèse de doctorat de l'école doctorale « sciences et technologies de l'information des télécommunications et des systèmes ».
- [7] :Ahmed F. Zobaa. Ramesh C. Bansal. « handbook of renewable energy technologies », edition World Scientifi.
- [8] Frédéric POITIERS. « ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE (machine asynchrone à cage + Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau)». Thèse doctorale de l'école polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.
- [9] : Site internet de l'association Danoise de l'industrie éolienne : "<http://www.windpower.org/fr/core.htm>".
- [10] 8 ancienne D. SAHEB KOUSSA, « bulletin des énergies renouvelables », juin 2008.
- [11] B. MULTON, G. ROBIN, O. GERGAUD, H. BEN AHMED « Le Génie Electrique dans le vent : état de l'art et recherches dans le domaine de la génération éolienne ». JCGE'03, Saint-Nazaire, 5 et 6 juin 2003.
- [12] Haritza CAMBLONG « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génératrice d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variables ». Thèse doctorale, Ecole nationale Supérieure d'Art et Métiers Centre de Bordeaux,

- soutenue le 18 décembre 2003.
- [13] : Bernard MULTON « Production d'énergie électrique par sources renouvelables ». Techniques de l'Ingénieur, traité Génie électrique, D4005, 2003.
- [14] S. Heier, "Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems", Publications John Wiley & Sons, ISBN 0-471-97143-X, 1998.
- [15] : 9 ancienne Wildi. Sybille, « l'électrotechnique », 4^{iem} édition de « de boeck ».
- [16] : 10 ancienne LouarFateh. SeffoudAbdelkarim. « étude génératrice asynchrone à double alimentation (rotor bobiné) pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne », Thème de mémoire de l'université de Badji Mokhtar, 2010.
- [17] R. Abdessemed, M. Kadjouj, "Modélisation des Machines Electriques", Presses de l'Université de Batna, Algérie, 1997.
- [18] Bogdan Vulturescu, « contribution à la commande robuste des système électromécaniques par la méthode du modèle de comportement, application à la commande des système multi machine », thèse en cotutelle entre l'université des sciences et technologies de Lille et l'université Politehnica de Bucarest. 1^{ier} Mars 2002.
- [19] : Carl J. Astron et Bjorn. Wittenmark, « Adaptive contrôle 2ndEdition». Livre
- [20] : 12 ancienne FisliSofian. Djouak Amar Djihad, « identification et commande en temps réel d'un processus dynamique- application : groupe moteur-alternateur », thème de mémoire de l'université de 8 mai 45 –Guelma-,1999.
- [21] Salam SAWADOGO, « MODELISATION, COMMANDE PREDICTIVEET SUPERVISION D'UN SYSTEME D'IRRIGATION », thèse de doctorat de de l'université PAUL SABATIER de TOULOUSE, 1992