

## Introduction générale

L'intense industrialisation des dernières décennies et la multiplication des appareils domestiques électriques conduit à des besoins planétaires en énergies électriques considérables. Face à cette demande, toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires.

Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de l'absence de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement, des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les futures générations.

Face à ces problèmes, et de façon à limiter l'emploi de centrales nucléaires, certains pays, aidés par la réglementation, se sont tournés vers de nouvelles formes d'énergie dites « renouvelables » faisant appel, de façon directe ou indirecte, à l'énergie solaire. Parmi celles-ci, l'éolien apparaît clairement en bonne place, non pas en remplacement des sources conventionnelles, mais comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie nucléaire [1].

Le développement d'énergie éolienne représente un grand investissement dans le domaine de la recherche technologique. Ces systèmes qui produisent de l'énergie à partir du vent peuvent constituer une alternative technologique et économique aux différentes sources d'énergie épuisables. D'ailleurs, la croissance de l'industrie éolienne mondiale est de l'ordre de 30% par an depuis le début des années 2000 [2]. L'utilisation des aérogénérateurs présente des avantages importants. En effet, ils sont pour l'instant l'un des moyens les plus écologiques pour obtenir de l'électricité et cette source reste inépuisable. En outre, la production d'énergie éolienne a été de plus en plus acceptée par les investisseurs ainsi que les parcs éoliens sont en cours de construction, car ce secteur est devenu rentable. Le coût de l'énergie du vent a diminué au point où il y a des endroits que le prix de l'énergie éolienne est compétitif par rapport à l'énergie conventionnelle [1].

L'énergie éolienne a non seulement un impact économique dans le monde, mais aussi un grand impact environnemental et social. L'utilisation de cette énergie réduit les combustions des combustibles fossiles et des émissions conséquentes. Elle réduit également la dépendance des pays à la consommation du pétrole, en créant des emplois pour sa construction, son exploitation et son entretien.

De nombreux travaux de recherche sur la commande éolienne ont été menés. Grâce à ces inventions, les dernières générations d'éolienne fonctionnent avec une vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques ainsi que l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique produite, par rapport aux éoliennes à vitesse fixe.

Aujourd'hui, la plupart des projets éoliens à vitesse variable d'une puissance supérieure à 1 MW, utilisent la machine asynchrone à double alimentation (MADA) [3], [2], [4]. Le principal avantage de cette machine est la possibilité de contrôler les puissances générées autour d'un point de fonctionnement.

Dans le cadre de notre travail, nous allons étudier une ferme éolienne basée sur des générateurs asynchrone à double alimentation (MADA) partant de la commande à la supervision de la puissance réactive totale de la ferme. Ce mémoire est donc constitué d'une introduction générale, de trois chapitres et d'une conclusion générale.

Le premier chapitre est consacré à la description de l'énergie éolienne et des notions principales sur cette technologie, où nous avons décrit la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis nous sommes attachés à une étude plutôt descriptive de l'ensemble des composantes d'un système éolien et les différents types d'éoliennes (à axe verticale, horizontal). Après nous avons examiné les deux grandes familles d'éoliennes existantes, à savoir les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable et l'intérêt de ce dernier.

Dans le deuxième chapitre nous avons étudié la modélisation mathématique de la partie mécanique de l'éolienne, nous présentons la stratégie de la vitesse mécanique de la turbine éolienne pour maximiser la puissance extraite, zone d'extraction maximale de la puissance (MPPT), ensuite on présentera des généralités sur la MADA, ses applications, ses variantes de fonctionnement et ses avantages suivies par un état de l'art sur la conversion électromécanique à travers les différents types de génératrices utilisées et les convertisseurs qui leur sont associés. Ainsi la modélisation de la MADA est présente, sa mise en équations permettra de simuler son modèle dans le mode générateur, puis nous allons étudier la commande vectorielle en puissance active et réactive statoriques par l'orientation du flux statorique de la MADA basée sur le régulateur classique **PI**. Cette dernière va nous permettre le contrôle indépendant des puissances. Une commande avancée nommée **PI-flou** [5], utilisée pour contrôler la MADA alimentée à flux statorique orienté afin de régler la puissance active et réactive du système, d'autre part on va aborder la modélisation des convertisseurs à deux niveaux (onduleur-redresseur) qui permettent l'échange d'énergie entre le rotor de la machine et le réseau. A la fin de ce chapitre on va étudier la modélisation d'une chaîne de conversion éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation et constituée d'un redresseur contrôlé par la technique de MLI, et un bus continu, l'ensemble est relié au réseau via un onduleur à MLI, et un filtre. On aura donc, une cascade basée sur deux convertisseurs à deux niveaux.

Dans le dernier chapitre on abordera la supervision et la gestion de la puissance réactive dans une ferme éolienne. Dans cette optique, plusieurs algorithmes de supervision de ces puissances seront analysés et discutés en se focalisant sur un algorithme basé sur des régulateurs **PI** et plus particulièrement l'algorithme de réglage de puissances active et réactive. Celui-ci assure le

dispatching des consignes de puissances active et réactive de la ferme sur lesEoliennes en égalité.  
Enfin, ce travail sera terminé par une conclusion générale et quelques perspectives de recherche envisagées.



## I.1 Energies renouvelables

Le monde évolue et avec lui les caractéristiques comme l'augmentation de la population, de l'activité industrielle et le changement du style de vie sont indiscutables. La consommation énergétique mondiale augmente sans cesse depuis 40 ans et rien ne laisse présager un ralentissement de cette croissance, surtout dans les pays en voie de développement.

La demande d'énergie actuelle peut donc servir de référence et de minorant strict pour évaluer la consommation future. Les ressources énergétiques de la planète se présentent sous deux formes différentes : énergies renouvelables (énergies de flux) et énergies épuisables (énergies de stock) existent en quantités limitées [6]

Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou de l'énergie nucléaire. La figure ( I.1) montre la répartition en termes d'énergie primaire dans le monde pour toutes les ressources actuelles [3]

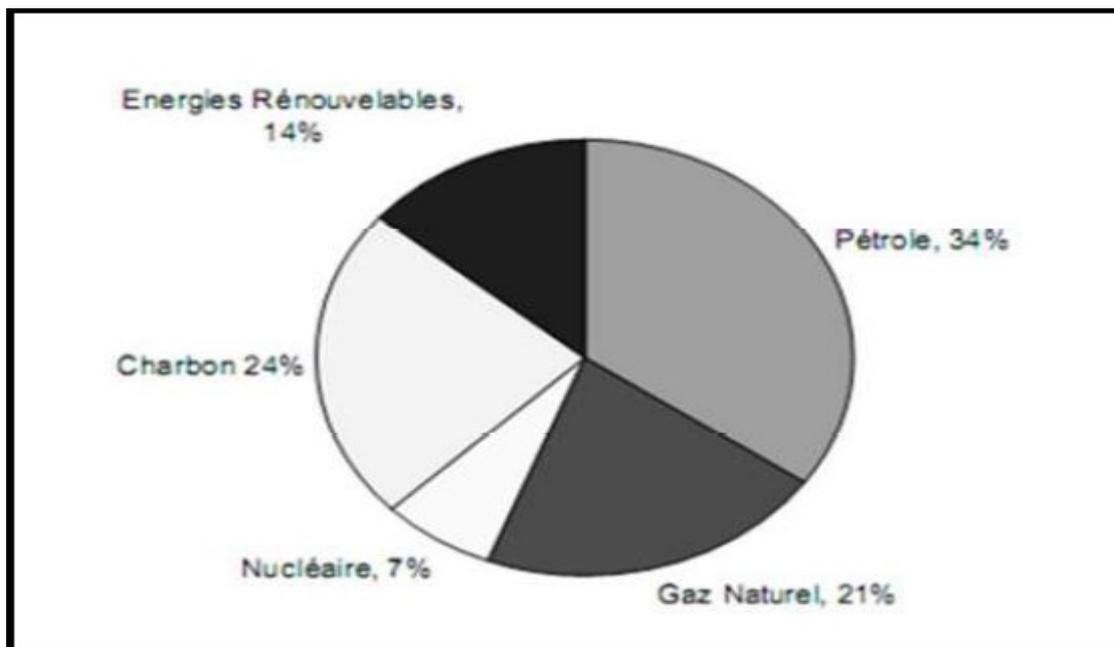


Figure I.1: Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde [5]

Les formes de production d'énergie non renouvelables engendrent une forte pollution environnementales par rejet des gaz à effet de serre qui provoques un changement climatiques irréversible ou dans le cas du nucléaire une pollution par radiation de longue durée qui pose le problème, aujourd'hui non résolu, du stockage des déchets radioactifs [3] ,[2]

Pour subvenir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il y a principalement deux façons possibles d'agir. La

première est de diminuer la consommation des récepteur d'énergie et augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant respectivement leur efficacité. Une deuxième méthode consiste à trouver et développer pour tenter de maintenir le niveau de la production énergétique mondiale. Des recherches sont en cours dans le domaine de la fusion des noyaux atomiques qui, éventuellement, pourraient être une solution énergétique du futur, mais l'avenir de cette filière et encore moins son avènement ne sont assurés[3],[6]

Dans l'immédiat, nous disposons de ressources en énergie renouvelable inépuisables, que nous sommes en mesure d'exploiter de plus en plus facilement en proprement. Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont connu une forte croissance ces dernières années.

## **I.2 L'énergie éolienne :**

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pu être «redécouverte» (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du dernier siècle, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées. Dans les années 60, fonctionnait dans le monde environ 1 million d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde [7].

La génération éolienne a connu son premier marché avec le « Wind rush » californien dans les années 1980 [8].

### **I.2.1 Définition de l'énergie éolienne**

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui permet de transformer une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique[9],[10]. Cette conversion se fait en deux étapes:

Au niveau de la **turbine (rotor)**, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.

Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

Le fonctionnement général est illustré par la figure (I.2)

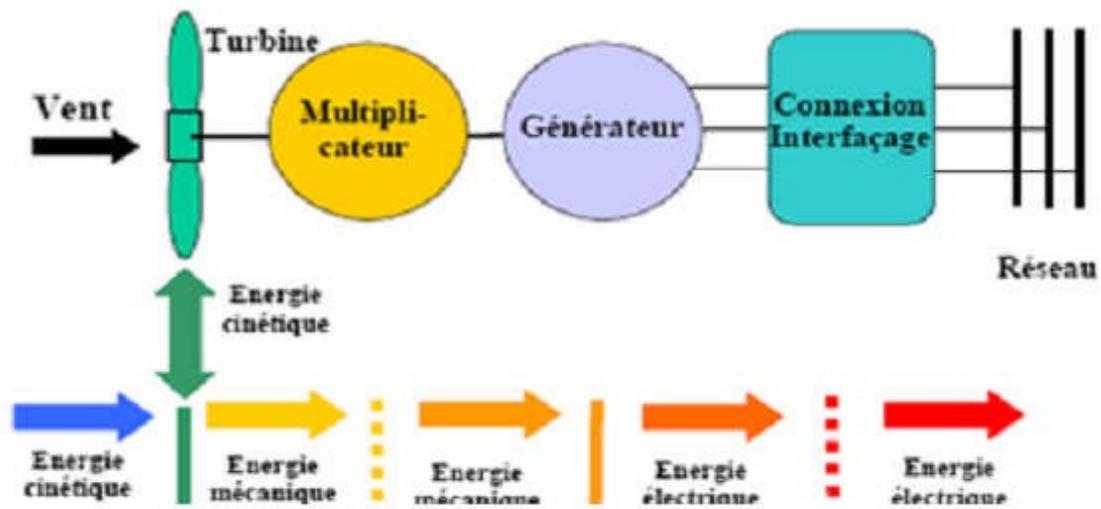


Figure I.2:La conversion éolienne[9]

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, propre sans rejet atmosphérique, géographiquement diffuse et sa source (vent) plus important en hiver. Cependant, le captage et la conversion d'énergie sont complexes, les matériaux coûteux et la source d'énergie difficile à prévoir et reste aléatoire[3].

### I.3 Principaux 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[11],[12]:

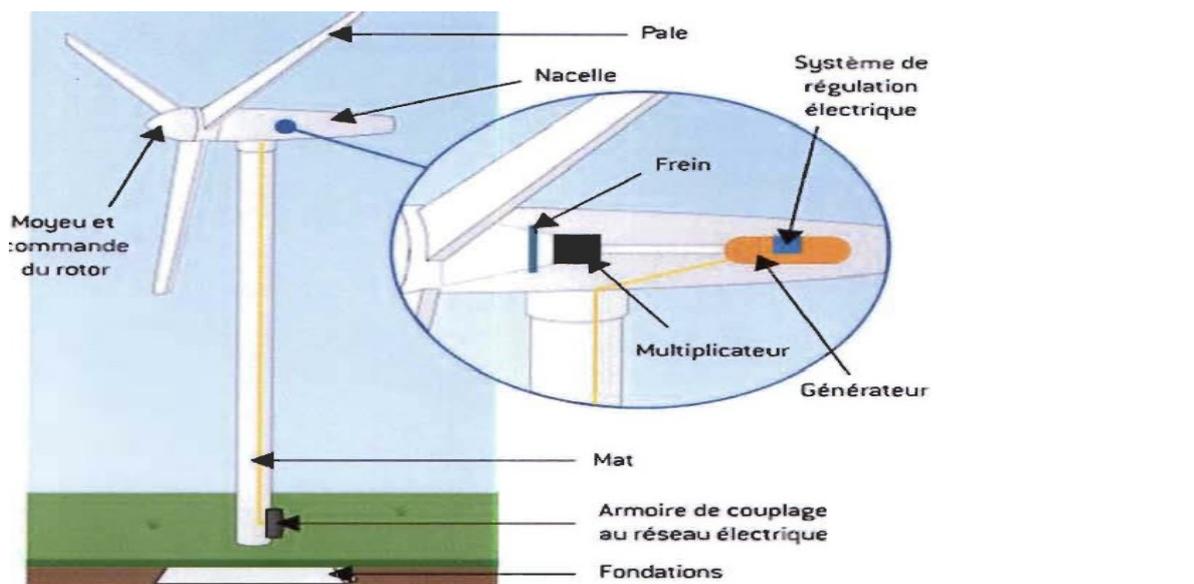


Figure I.3:Les éléments d'une éolienne

**Le mât** :généralement un tube d'acier doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations au niveau du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en oeuvre 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)[11],[4].

**La nacelle** : comprend: arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Tous ces éléments mécaniques permettent de coupler le rotor éolien au générateur électrique. 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) figure(I.4). En plus, un système de refroidissement par air ou par eau est souvent utilisé, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne[8],[13].

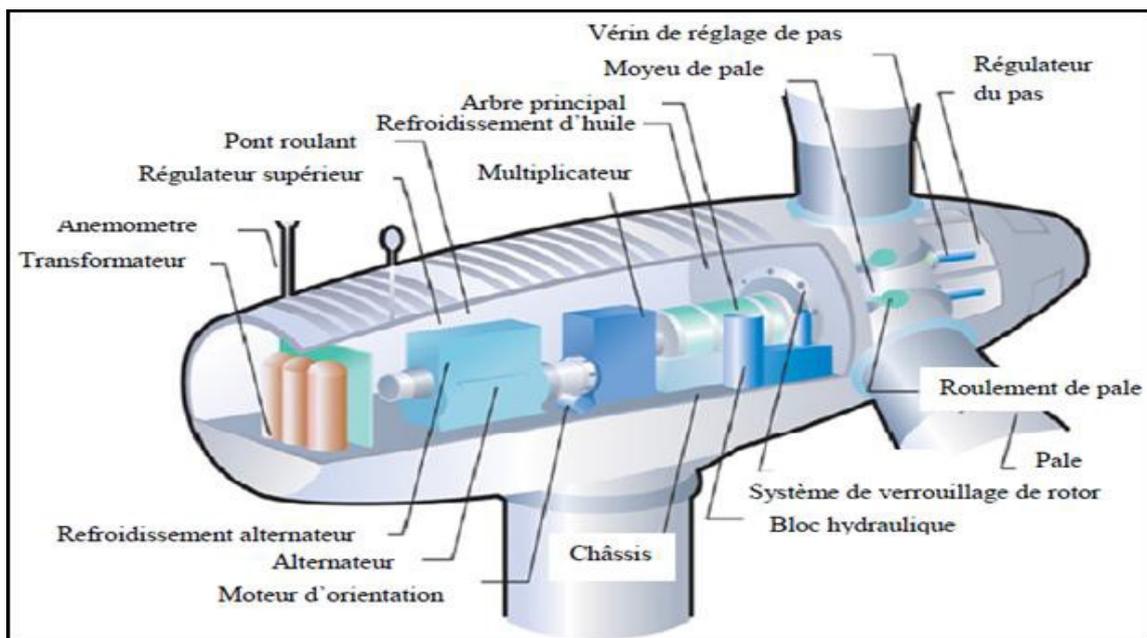


Figure I.4:La nacelle

- **Le rotor** : formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire et le bruit[13]

#### I.4 Fonctionnement d'une éolienne[10]

Le principe de fonctionnement de ces éoliennes a été largement présenté ces dernières années

Dans plusieurs travaux. Quand le vent se lève, le calculateur (1), grâce à la girouette (2) située à l'arrière de la nacelle, commande aux moteurs d'orientation (3) de placer l'éolienne face au vent.

Les trois pales (4) sont mises en mouvement par la seule force du vent. Elles entraînent avec elles l'axe lent (5), le multiplicateur (6), l'axe rapide (7) et la génératrice asynchrone (8). Dès que la vitesse du vent est suffisante (15 km/h), l'éolienne peut être couplée au réseau. Les pales tournent alors à environ 30 tr/mn et entraînent la génératrice à 1515 tr/mn. Cette vitesse de rotation restera constante tout au long de la période de production. Lorsque la vitesse du vent atteint 50 km/h, l'éolienne fournit sa puissance nominale. La génératrice délivre alors une tension et un courant électrique alternatif dont la puissance varie en fonction de la vitesse du vent.

Pour des vitesses de vent supérieures à 50 km/h, la puissance est maintenue constante en réduisant progressivement la portance des pales. L'unité hydraulique (9) régule la portance en modifiant l'angle de calage des pales qui pivotent sur leurs roulements (10). Lorsque la vitesse du vent dépasse 90 km/h, les pales sont mises en drapeau (parallèles à la direction du vent), leur portance devient quasiment nulle, l'éolienne cesse alors de tourner, elle ne produit plus d'électricité. Tant que la vitesse du vent reste supérieure à 90 km/h, le rotor tourne « en roue libre » et la génératrice est déconnectée du réseau. Dès que la vitesse du vent diminue, l'éolienne se remet en production.

Toutes ces opérations sont entièrement automatiques. En cas d'arrêt d'urgence, un frein à disque (11) placé sur l'axe rapide permet de mettre l'éolienne en sécurité. Au pied de chaque éolienne, un transformateur convertit la tension produite en tension du réseau sur lequel toute l'électricité produite est déversée figure (I.5).

On peut classer les éoliennes selon leurs puissances nominales dont chaque type a son propre utilisation :

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW, elles sont utilisées hors réseau dans des sites non interconnectés, soit pour chargement de batteries soit pour pompage de l'eau.

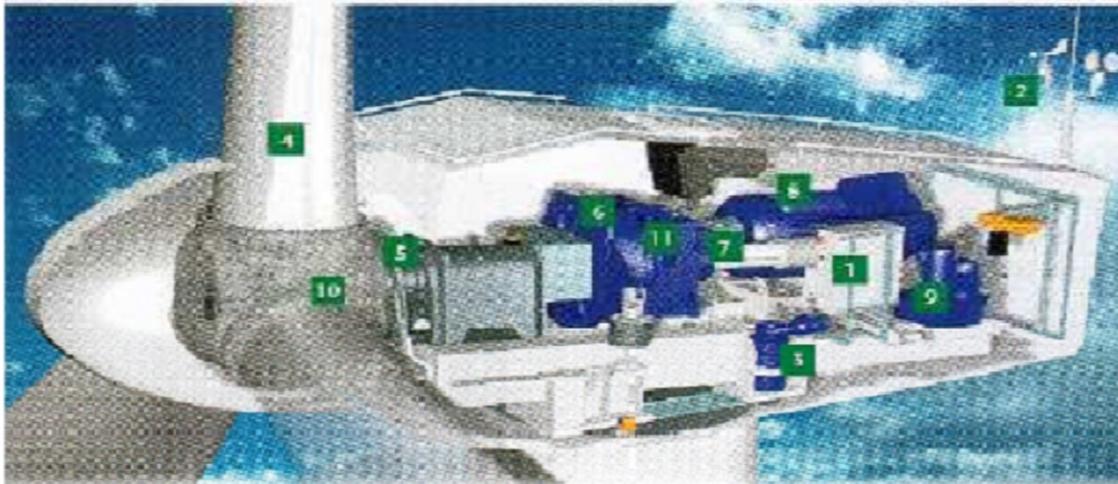


Figure I.5:L'éolienne à l'intérieur [14]

Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW utilisées dans des réseaux isolés, avec des systèmes hybrides éolien réduire les coûts de production dans les régions éloignées.

- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW elles se connectées au réseau central pouvant être constitué de plusieurs machine[10].

## I.5 Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

### I.5.1 Éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années 1920, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation[7],[11].

- Le rotor de Savonius(du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur Figure(I.6)[11],[3]

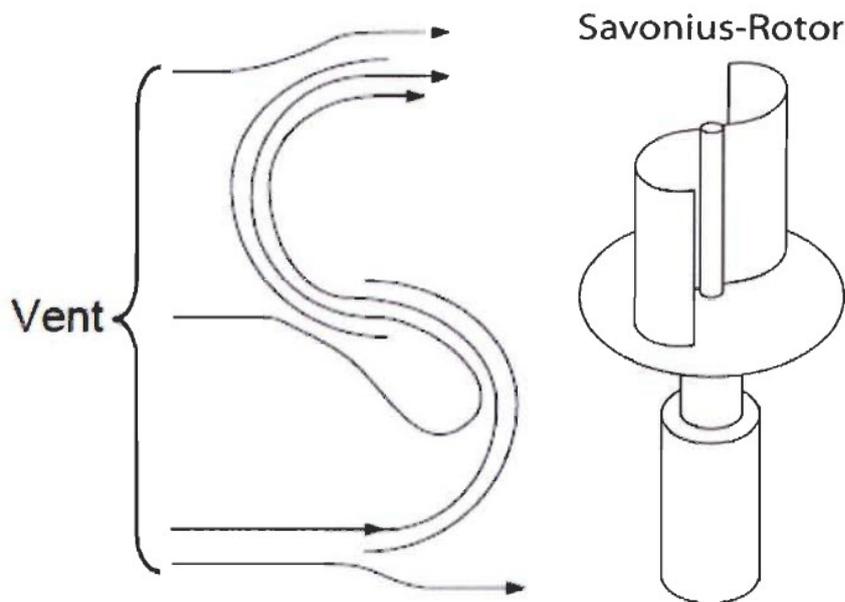


Figure I.6:Éolienne type Savonius[8]

Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrius (ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 1930). Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles Figure (I.7) [7],[12]est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas se déclencher d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'uneéolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur)[15] .

Ces genres d'éoliennes ne sont quasiment plus utilisées, à cause les contraintes mécaniques au niveau du sol et occupent plus d'espace.

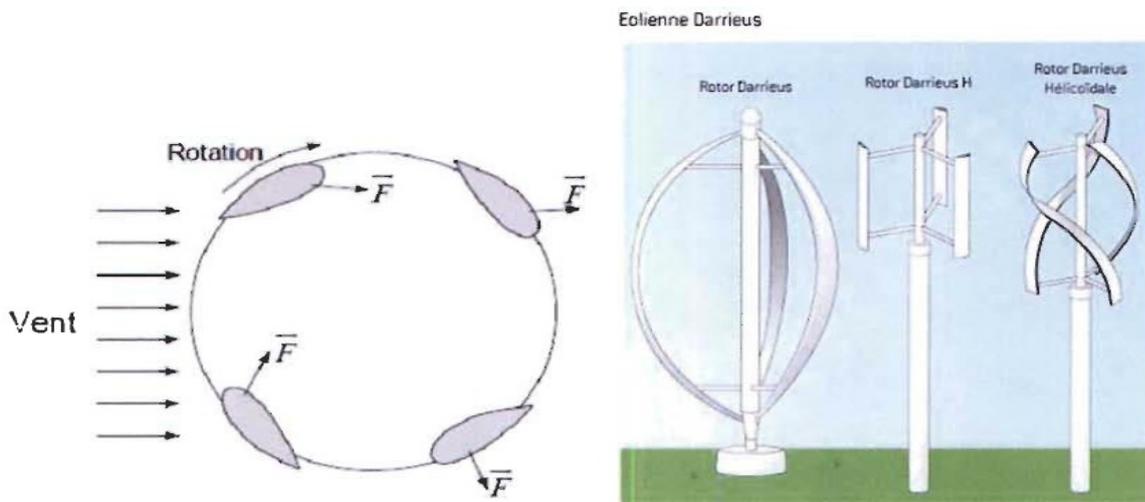


Figure I.7:Éoliennes type Darrieus

### Eolienne à axe horizontal

Le principe est identique à celui des moulins à vent où le nombre des pales peut varier de 1 jusqu'à 3 figure (I.8). Les plus répandues sont celles à conception tripale (80% des fabricants fabriquent des aérogénérateurs tripales) car elle offre un bon compromis entre le coût, la vitesse du rotor et le coefficient de puissance[8] .



Figure I.8:Éolienne à axe horizontal (3MW) [14]

Ce type d'éoliennes est le plus utilisé de par sa faible emprise au sol limitant l'occupation de place et par son rendement aérodynamique satisfaisant d'où l'efficacité énergétique .[16]

Selon l'emplacement par rapport au vent on peut distinguer les éoliennes face au vent (I.1.a) et les éoliennes sous le vent (I.9.b). dans le cadre de ce travail nous limiterons l'étude uniquement aux éoliennes à axes horizontaux.

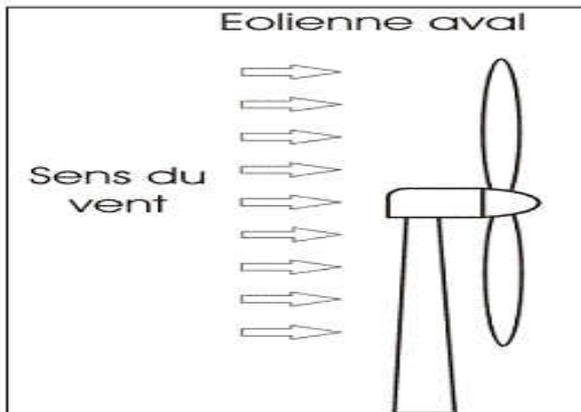


Figure I.9:b Eolienne sous le vent

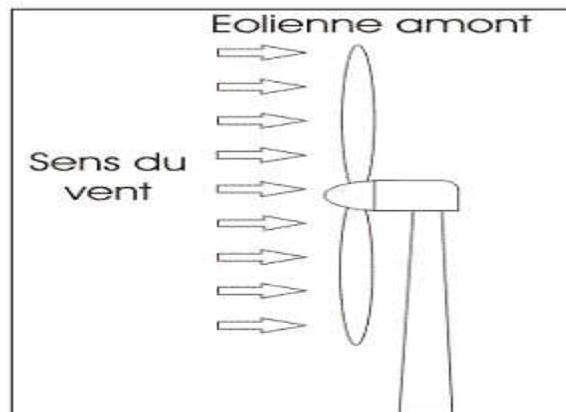


Figure I.10:.a Eolienne face au vent

## I.6 Avantages et inconvénients des énergies éoliennes :

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après.

### I.6.1 Les avantage :

- L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement.
- L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergie notamment, contribuent à un changement global du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général. La concentration de  $\text{CO}_2$  a augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et elle ait doublé pour 2050. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6° depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5°C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand. Les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais il est possible d'avancer qu'il provoquera une augmentation du niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100 [17].
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable.
- 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 CO<sub>2</sub>, 21 mille tonnes de SO<sub>2</sub> et 17,5 mille tonnes de NO<sub>2</sub>. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides [17].
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent 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 à ces pays pour se développer.
- L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple.
- Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.
- Ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.

### **I.6.2 Les inconvénients.**

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel. Ca reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit, il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur.
- L'impact sur les oiseaux, certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs.
- la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est pas toujours très bonne.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques.

## I.7 Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

Le principe de fonctionnement de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique a été largement présenté ces dernières années dans plusieurs travaux[18],[19],[20],[21],[22]. L'énergie cinétique du vent est captée par les pales ensuite transformée en énergie électrique grâce à des générateurs électriques de type synchrone ou asynchrone.

## I.8 Les éoliennes à vitesse fixe

Les premières éoliennes commercialisées reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique figure (I.11) Un multiplicateur de vitesse entraîne cette machine à une vitesse qui est maintenue approximativement constante grâce à un système mécanique d'orientation des pales. Une batterie de condensateurs est souvent associée pour compenser la puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone à cage.

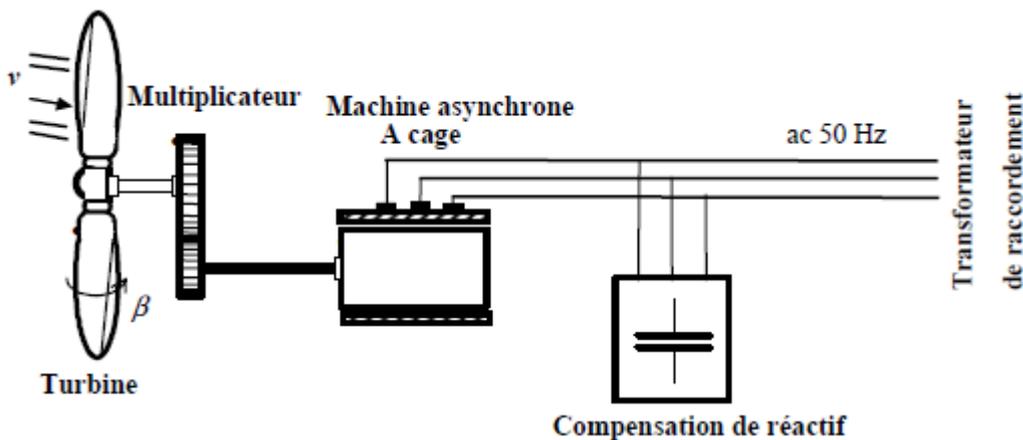


Figure I.11: Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage.

La conception des turbines éoliennes à vitesse fixe est fortement liée aux caractéristiques aérodynamiques et mécaniques. Le temps de réponse de certaines de ces parties se situe dans la gamme de la dizaine de millisecondes[22]. En conséquence, en cas de rafales de vent, on peut observer une variation rapide et importante de la puissance électrique générée.

Cette configuration présente les inconvénients suivants :

- Un dispositif consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone.
- Bruyant, à cause de la modification du système d'orientation des pales fortement sollicité.

- Variations fréquentes du couple mécanique à cause du mouvement des pales pour garder une vitesse constante, ce qui entraîne des variations rapides du courant dans le réseau.
- Impossibilité de réglage de la puissance générée.

### I.9 Intérêt de la vitesse variable

L'ensemble des caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent est illustré sur la figure. Partir de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si la génératrice est entraînée à une vitesse fixe les maxima théoriques des courbes de puissance ne seraient pas exploités. Pour cela, et afin de pouvoir optimiser le point de fonctionnement en terme de puissance extraite, il y a lieu de pouvoir ajuster la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice en fonction de la vitesse du vent.

Actuellement, les éoliennes de forte puissance, connectées aux réseaux de moyenne tension, fonctionnent sous vitesse variable. Les avantages principaux des éoliennes à vitesse variable comparées à celles à vitesse fixe sont les suivants[22] :

- Augmentation de la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent où le maximum de puissance peut être aisément converti.

Simplicité du système d'orientation des pales. Grâce au contrôle de la vitesse du générateur, les constantes de temps mécaniques des pales peuvent être plus longues, réduisant la complexité du système d'orientation des pales et son dimensionnement par rapport à la puissance nominale  $P_n$

- Réduction des efforts mécaniques grâce à l'adaptation de la vitesse de la turbine lors des variations du vent. De ce fait, l'incidence des rafales de vent sur la puissance générée peut être affaiblie.
- Réduction du bruit lors des fonctionnements à faible puissance car la vitesse est lente.

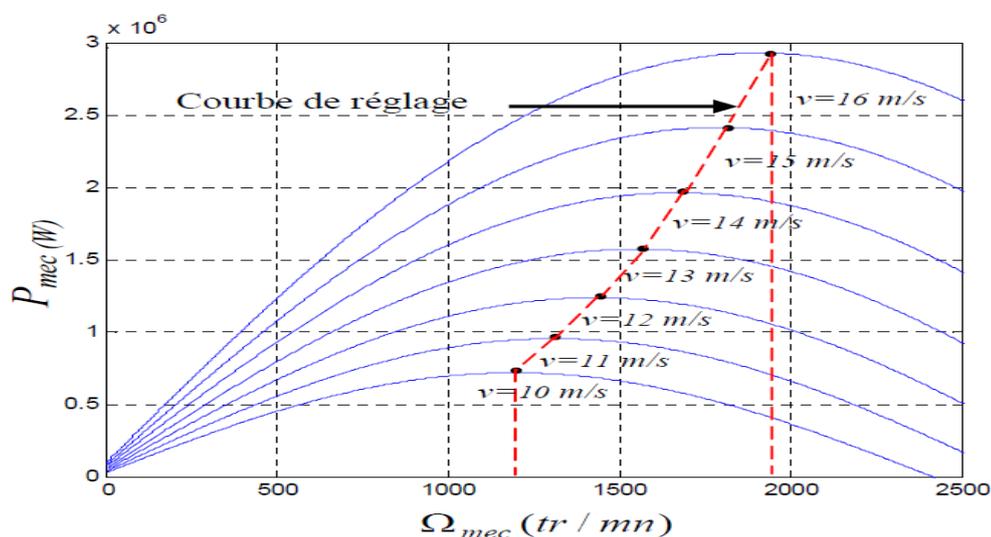


Figure I.12: Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne

La courbe typique donnant la puissance aérodynamique d'un aérogénérateur, fonctionnant à vitesse variable, en fonction de la vitesse de vent est illustrée sur la figure (I.11). Trois zones de fonctionnement peuvent être distinguées. La zone *A* correspond aux vitesses très faibles du vent insuffisantes pour entraîner l'éolienne et produire de la puissance. La zone *B* correspond aux vitesses moyennes dont le système de contrôle de l'aérogénérateur peut intervenir pour contrôler la puissance électrique à générer. La zone *C* correspond aux vitesses très élevées du vent pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale pour éviter des dégâts sur la structure. Par conséquent, la puissance électrique produite est maintenue constante et égale à sa valeur nominale.

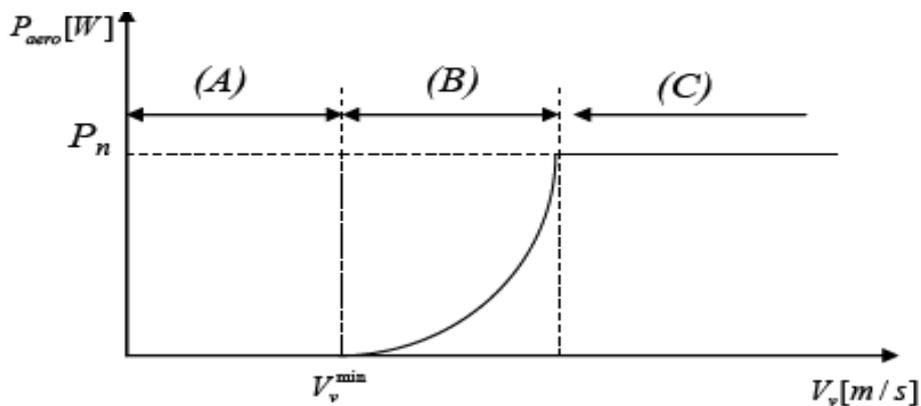


Figure I.13: Courbe typique de la puissance produite d'un aérogénérateur à vitesse variable.

## I.10 Conclusion

Dans ce chapitre, il a été présenté une brève description du domaine des énergies renouvelables dans le monde où on est intéressé plus particulièrement à l'énergie éolienne, pour ce fait on a montré le développement de cette énergie par un bref historique.

Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension du fonctionnement des éoliennes, les différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement (calage variable ou décrochage aérodynamique) ont été décrits selon leur conception mécanique ainsi leur technologie introduisant différentes machines pour la conversion d'énergie.







## II.1 Introduction

La structure des différents types d'éoliennes n'est pas simplifiée, car cette dernière correspond à un ensemble d'une turbine éolienne et un générateur asynchrone. La turbine éolienne est constituée également d'une turbine et d'un multiplicateur relié entre eux par un arbre. L'étude de la conception l'analyse des dynamiques du système éolien est vraiment délicate, car les réponses dynamiques du système simulé dépendent fortement des modèles mathématiques appliqués au système réel. Le problème de la modélisation est d'abord comment représenter le système d'une façon précise par des équations mathématiques, et ensuite les simplifier afin de réduire la dimension et le temps de calcul sans trop modifier les dynamiques du système.

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation globale de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

## II.2 Modèles du vent

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs. Son énergie cinétique constitue la source primaire d'énergie. Le vent est en fait un champ de vitesses de déplacement de masses d'air caractérisé par sa vitesse et sa direction qui sont affectées par plusieurs facteurs, en particulier, le phénomène de cisaillement et l'effet d'obstacle de la tour.

Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, évolue au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent sera modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques :

$$v_v(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n \sin(b_n w_v t)) \quad (\text{II.1})$$

Ou :

**A** : la valeur moyenne de la vitesse du vent .

**a<sub>n</sub>** : amplitude de l'harmonique de l'ordre n.

**w<sub>v</sub>** : pulsation de l'harmonique de l'ordre n .

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

**v<sub>v</sub>** : Evolution temporelle de la vitesse du vent .

## II.3 Modélisation de la turbine éolienne à vitesse variable

La vitesse du vent qui représente la grandeur d'entrée de conversion d'énergie éolienne, a une variation aléatoire et a une caractéristique très fluctuante, Alors la modélisation de la turbine éolienne est indispensable et cela pour une meilleure exploitation de la vitesse du vent.[23]

### II.3.1 Hypothèses simplificatrices :

Pour la modélisation mécanique de la turbine, la partie mécanique qui sera étudiée comprend trois pales orientables et de longueur  $R$ . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse  $\Omega_{turbine}$  qui est relié à un multiplicateur de gain  $G$ . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique Figure (II.1)

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc:

- la même inertie  $J_{pale}$ .
- la même élasticité  $Kb$ .
- le même coefficient de frottement par rapport à l'air  $db$ .

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support  $f_{pale}$ .

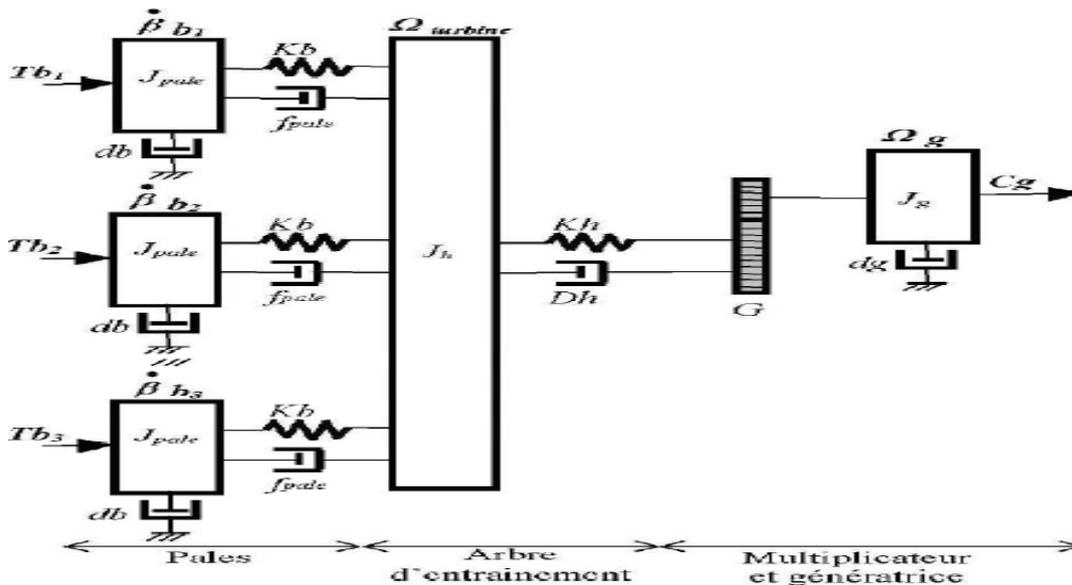


Figure II.14: Système mécanique de l'éolienne

Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées  $\dot{\beta}_{b1}$ ,  $\dot{\beta}_{b2}$ ,  $\dot{\beta}_{b3}$ . Chaque pale reçoit une force  $Tb_1$ ,  $Tb_2$  et  $Tb_3$  qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée. [1]

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par:

- son inertie  $J_h$ .
- son élasticité  $Kh$ .
- son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur  $Dh$ .

Le rotor de la génératrice possède:

- une inertie  $J_g$ .
- un coefficient de frottement  $dg$ .

Ce rotor transmet un couple entrainant ( $C_g$ ) à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée  $\Omega_{mec}$ . Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée ( $Tb_1 = Tb_2 = Tb_3$ ) alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques [s] et [8]. De part la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air ( $d_b$ ) est très faible et peut être ignoré. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice. On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses figure (II.2)

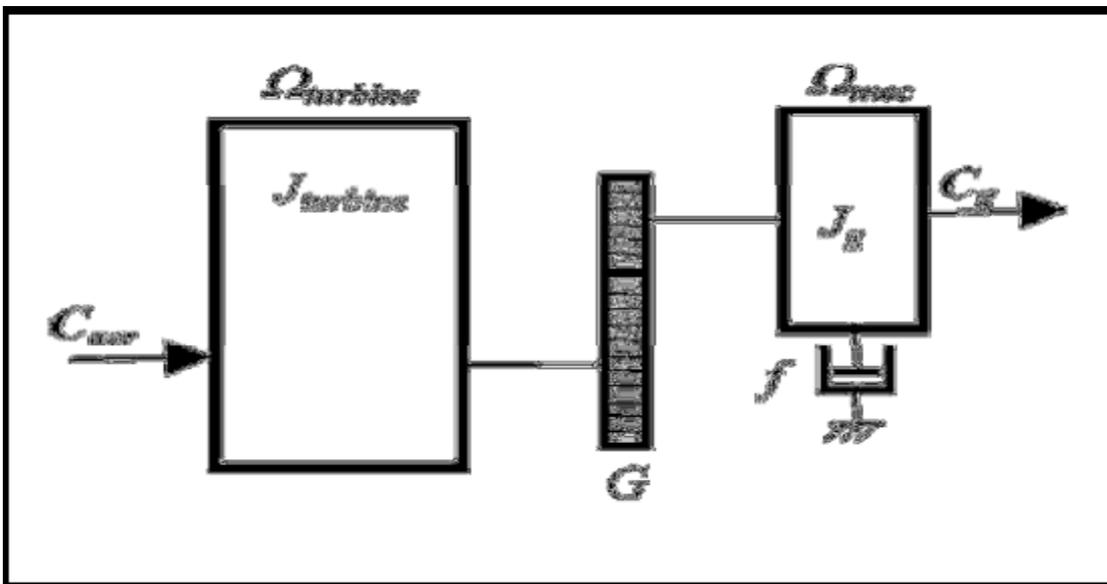


Figure II.15: Modèle mécanique simplifiée de la turbine [1]

### II.4 Modélisation de la turbine

Le dispositif, que nous étudions ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur  $R$  entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain  $G$ , comme le montre la figure (II.3)

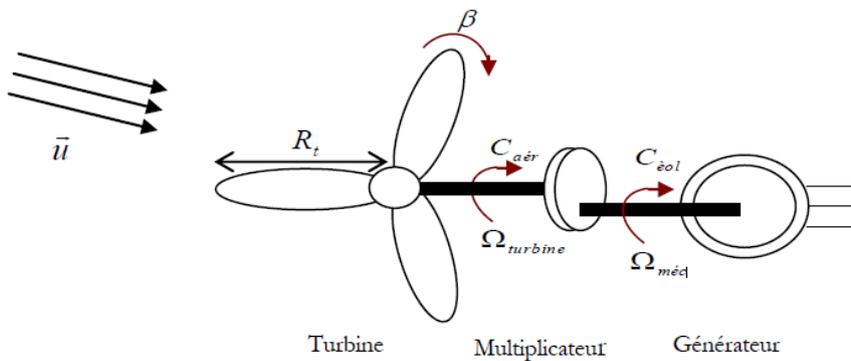


Figure II.16: Schéma de la turbine éolienne

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

$$P_u = \frac{1}{2} \rho s v^3 \quad (\text{II.2})$$

La puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors [24] ,[25]:

$$P_{aér} = C_p P_u = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho s v^3 \quad (\text{II.3})$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure (II.4) représente la variation de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse  $\lambda$  et de l'angle de l'orientation de la pale  $\beta$ . Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent [17],[26],[27],[28]:

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} R}{u} \quad (\text{II.4})$$

Où:  $\Omega_{turbine}$  est la vitesse de la turbine.

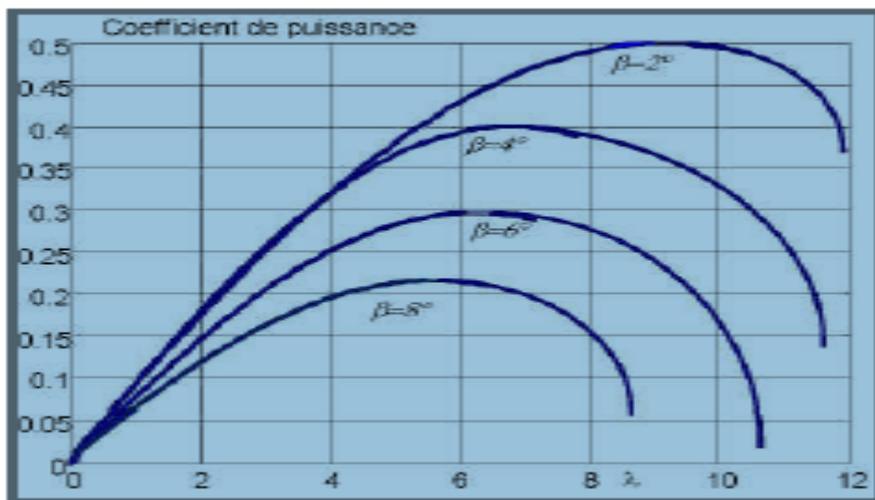


Figure II.17: Coefficient de puissance  $C_p$  en fonction de  $\lambda$  pour de différents  $\beta$

Connaissant la vitesse de la turbine [3] , [29], le couple aérodynamique est donc directement déterminé par:

$$C_{aér} = \frac{P_{aér}}{\Omega_{turbine}} \quad (\text{II.5})$$

L'expression du coefficient de puissance pour la turbine éolienne de 1.5 MW est donnée par l'équation suivante : [47 ; 48 ; 49]

$$C_p = 0.5 - 0.167(\beta - 2) \cdot \sin \left[ \frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184(\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (\text{II.6})$$

## II.5 Modèle du multiplicateur[24],[30]

Le multiplicateur adapte une vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les deux équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aér}}{G} \quad (II.7)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.8)$$

### II.5.1 Equation dynamique de l'arbre[4],[25],[16]

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie  $J_{turbine}$ , et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale  $J$  constituée de l'inertie de la turbine reportée

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \quad (II.9)$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe. L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total  $C_{méc}$  appliqué au rotor

$$J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{méc} \quad (II.10)$$

Où :

$J$  est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice. Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique  $C_{cem}$  produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux  $C_{vis}$ , et le couple issu du multiplicateur  $C_g$ . [24],[31],[30]

$$C_{méc} = C_g - C_{cem} - C_{vis} \quad (II.7)$$

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux  $f$ :

$$C_{vis} = \Omega_{méc} f \quad (II.8)$$

$$f = \frac{f_{turbine}}{G^2} f_g \quad (II.9)$$

Le schéma de la figure (II.5) illustre les grandeurs qui interviennent au niveau de la turbine. Cette dernière génère le couple aérodynamique (équation II.5) qui est appliquée au multiplicateur. Les entrées de la turbine sont la vitesse du vent, l'angle d'orientation des pales, et la vitesse de

rotation de la turbine. Le modèle du multiplicateur transforme la vitesse mécanique et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de la turbine et en couple de multiplicateur (équations II.8 et II.9). Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique, il a donc deux entrées : le couple du multiplicateur, le couple électromagnétique fourni par la génératrice. La vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées : l'angle de la pale et le couple électromagnétique de la génératrice. La vitesse du vent est considérée comme perturbation.

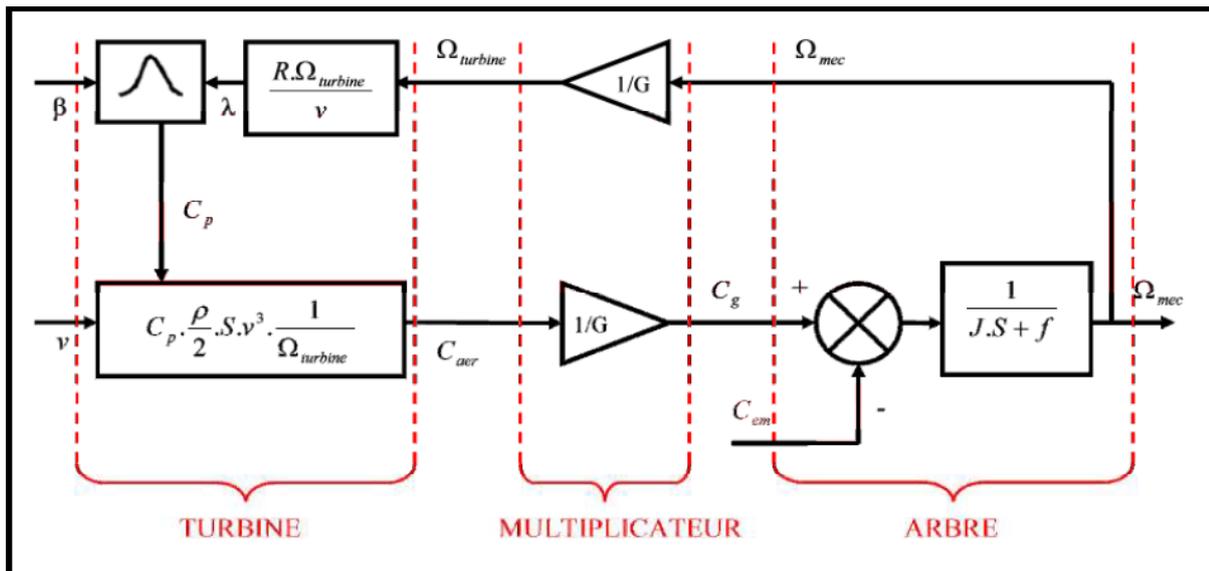


Figure II.18:schéma bloc du modèle de la turbine[31]

## II.6 Stratégies de commande de la turbine éolienne :

### II.6.1 Caractéristique puissance vitesse d'éolienne de grande puissance

La caractéristique Puissance-vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre zones figure (II.6)

Quatre zones principales de fonctionnement peuvent être distinguées:

- Zone 1 : C'est la zone de démarrage de la machine, la puissance électrique est assez faible et la vitesse mécanique atteint presque 70% du synchronisme.

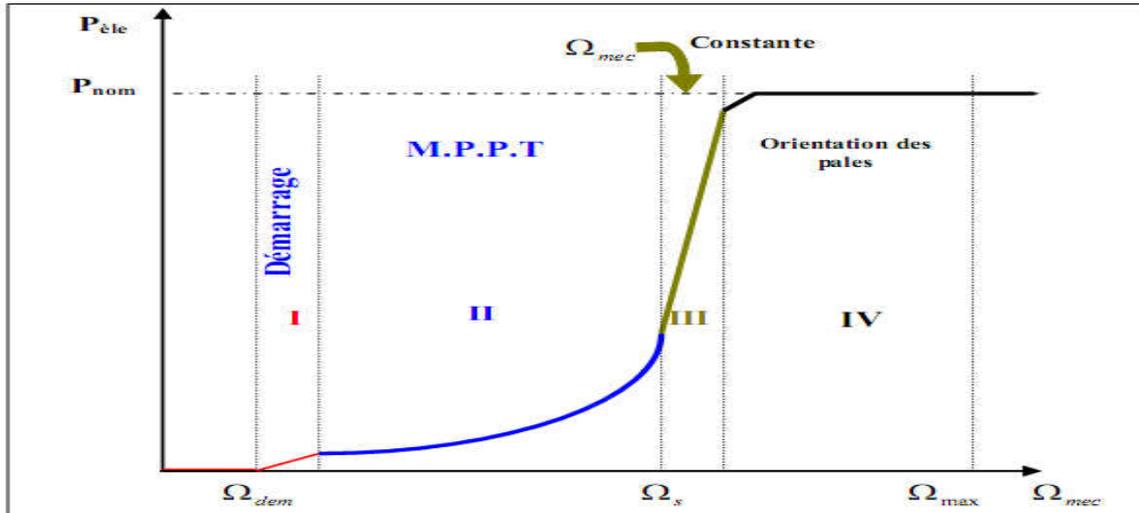


Figure II.19:Caractéristique puissance vitesse typique d'une éolienne de grande puissance[31]

- Zone 2 : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliqué. Pour extraire le maximum de la puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale, c'est à dire  $\beta=2^\circ$ [25].  
Ce processus continue jusqu'à atteindre une certaine valeur de la vitesse mécanique. C'est la vitesse nominale.
- Zone 3 : Au delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale  $p_{nom}$ .
- Zone 4 : Arrivée à la puissance nominale  $P_{nom}$ , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales : pitch control. Par mesure de sécurité, si la vitesse du vent devient trop importante et risque d'endommager l'éolienne, l'angle de calage des pales se fixe à  $90^\circ$ . C'est la mise en drapeau qui met fin au fonctionnement de l'éolienne jusqu'à ce que la vitesse du vent devienne moins importante.

Dans le cadre de ce mémoire, le fonctionnement dans la zone 2 qui nous intéresse, où on va présenter et appliquer différentes techniques d'extraction de maximum de puissance.

La caractéristique équivalente mesurée sur l'éolienne de Schelle de 1.5 MW est représentée sur la figure(II.7)

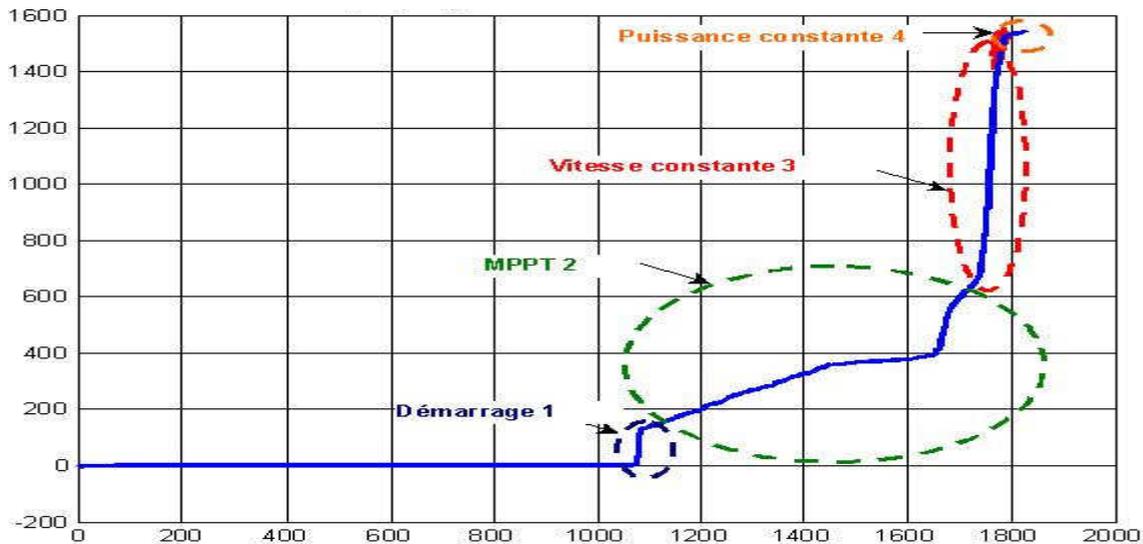
**Puissance électrique(KW)****Vitesse mécanique(tr/min)**

Figure II.20:Caractéristique puissance vitesse mesurée d'une éolienne de 1.5 MW[32]

**II.7 Techniques d'extraction du maximum de la puissance****II.7.1 Bilan des puissances:**

L'équation (II.3) quantifie la puissance capturée par la turbine éolienne. Cette puissance peut être essentiellement maximisée en ajustant le coefficient  $C_p$ . Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice (ou encore du ratio de vitesse), l'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance [33]. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quel que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. En régime permanent, la puissance aérodynamique  $P_{aer}$  diminuée des pertes (représentées par les frottements visqueux) est convertie directement en puissance électrique figure (II.8).

$$P_{ele} = P_{aer} - \text{pertes} \quad (II.10)$$

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

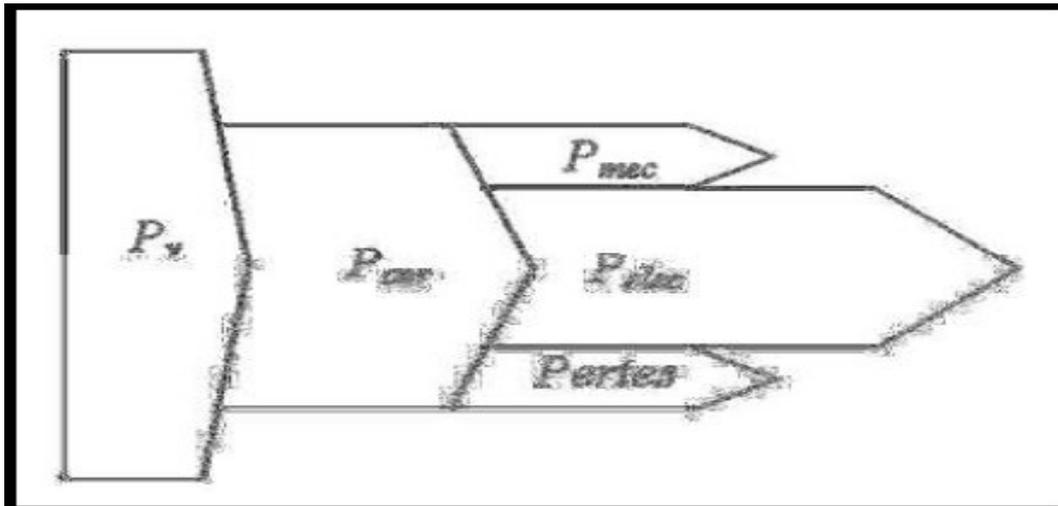


Figure II.21:Diagramme de conversion de puissance

Dans cette partie, nous présenterons différentes stratégies pour contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (MPPT) et correspond à la zone 2 de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne[25],[34]. On trouve deux genres de structures de commande qui sont maintenant expliquées[1],[32]figure (II.9)

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique[25],[35] .
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique[24] .



Figure II.22:Stratégies de commande de la turbine étudiée

### II.7.2 Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitessea Principe général :

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

$$C_{em} = C_{em\_ref} \cdot$$

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. Plusieurs dispositifs de commande peuvent être envisagés.

Comme explique dans la partie (II.5.1), la vitesse est influencée par l'application de trois couples: Un couple éolien, un couple électromagnétique et un couple résistant.

En regroupant l'action de ces trois couples, la vitesse mécanique n'est plus régie que par l'action de deux couples, le couple issu du multiplicateur  $C_g$  et le couple électromagnétique  $C_{em}$

$$J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = \frac{1}{J} (C_f - f\Omega_{méc} - C_{em}) \quad (II.11)$$

Le modèle de la turbine se simplifie. La structure de commande obtenue consiste à régler le couple apparaissant sur l'arbre de la turbine de manière à fixer sa vitesse à une référence.

On peut écrire

$$C_{em\_ref} = PI_{\Omega}(\Omega_{ref} - \Omega_{méc}) \quad (II.12)$$

Où:

PI : est le régulateur de vitesse.

$\Omega_{ref}$  est la vitesse mécanique de référence.

Cette vitesse de référence dépend de la turbine à fixer ( $\Omega_{tur\_ref}$ ) pour maximiser puissance extraite.

En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc :

$$\Omega_{ref} = G\Omega_{tur\_ref} \quad (II.13)$$

La référence de la vitesse de la turbine correspondant à la valeur optimal du ratio de vitesse,  $\lambda_{Cpmax}$  (à  $\beta$  constant égale à  $2^\circ$ )[9] permettant d'obtenir la valeur maximale du  $C_p$  figure(II.10)

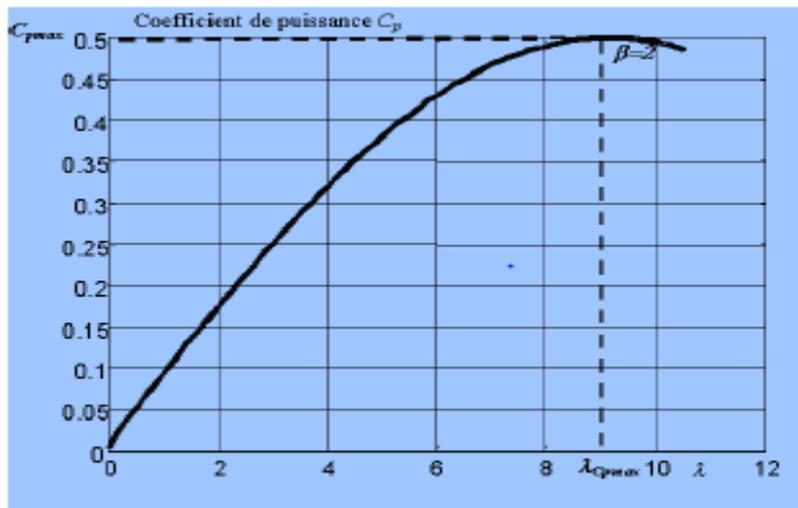


Figure II.23: Fonctionnement optimal de la turbine.

Elle est obtenue à partir de l'inversion de l'équation (II.4)

$$\Omega_{tur\_ref} = \frac{\lambda_{cpmax} v}{R} \tag{II.14}$$

### II.7.3 Conception du correcteur de vitesse

L'action du correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches [23],[36]:

- Il doit asservir la vitesse mécanique .
- Il doit atténuer l'action du couple.

La représentation simplifiée sous forme de schéma bloc se présente à la figure (II.11)

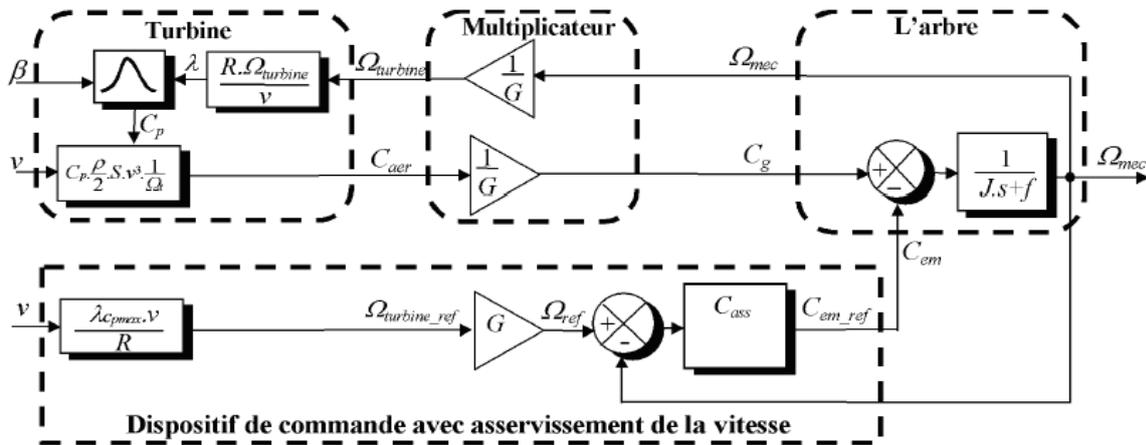


Figure II.24:Schéma bloc de la maximisation de la extraite avec asservissement de la vitesse

### II.8 Résultats de simulation.

Le modele de la turbine présenté dans la figure (II.12)ainsi que les structures de commande sont faits sous l'environnement Matlab/Simulink. Les résultats de simulation que nous allons présenter dont prévus pour une turbine de 1.5MW dont les parametres dans ( l'annexe A)

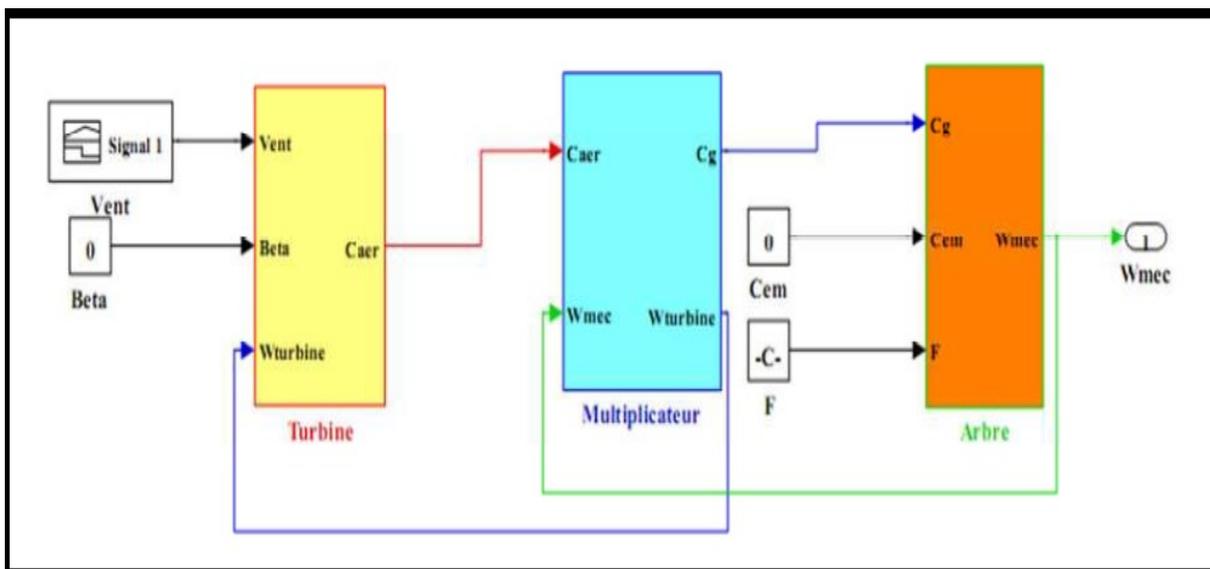


Figure II.25:schéma bloc du modèle de la turbine en boucle ouvert.

La figure( II.13.a)présente le profil du vent qui sera appliqué éolienne dont valeur moyenne est autour de (13m/s). Cette vitesse est estimée en Algérie et en particulier dans le sud et l'ouest.

Les résultats de simulation montrent que la variation de la vitesse mécanique (rotor) figure(II.13.b).best adaptée à la variation de la vitesse du vent. Ceci montre l'influence de la variation de la vitesse mécanique en fonction de la vitesse du vent .

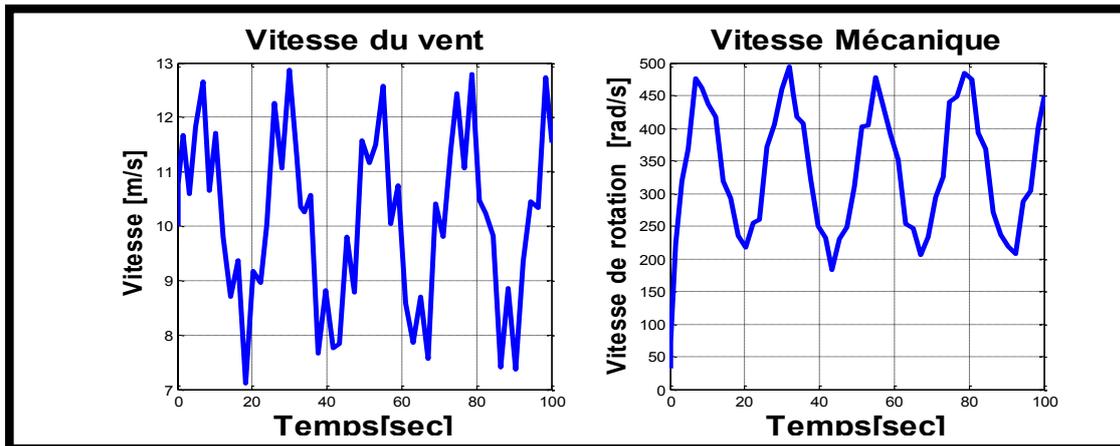


Figure II.26:Allure de vitesse : (a) de vent ; (b) Mécanique

Afin d'exploiter le maximum d'énergiecinétique du vent disponible, la système nommé **MPPT**est indispensable. La puissance captée par la turbine éolienne peut être essentiellement maximisée en ajustant la coefficient  $C_p$ . Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice (ou encore du ratio de vitesse  $\lambda$ ). Acet effet il est nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quelle que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice. La figure(II.14) montre le modèle de la turbine dans la zone 2 (**M.P.P.T**) de fonctionnement de l'éolienne.

Nous avons effectué des simulations pour asservir la vitesse mécanique, pour montrer cela, on a adapté un régulateur classique de type **PI** (Annexe B). La simulation du fonctionnement de la turbine dans la zone 2 a été réalisée par le logicielMatlab/Simulink pendant une durée égale à 100s.

Concernant le coefficient de puissance représenté dans la figure (II.16) est obtenu pour un angle de calage fixe ( $\beta=2^\circ$ ), qui nous donne un  $\lambda_{opt}=8.9$  monter dans la figure (II.17)

On remarque que le  $C_p$  et  $\lambda$  atteignent ces valeurs maximums, ils cherchent à être garder En maximum possible dont le but d'augmenter la production, et varie légèrement selon le changement de la vitesse du vent.

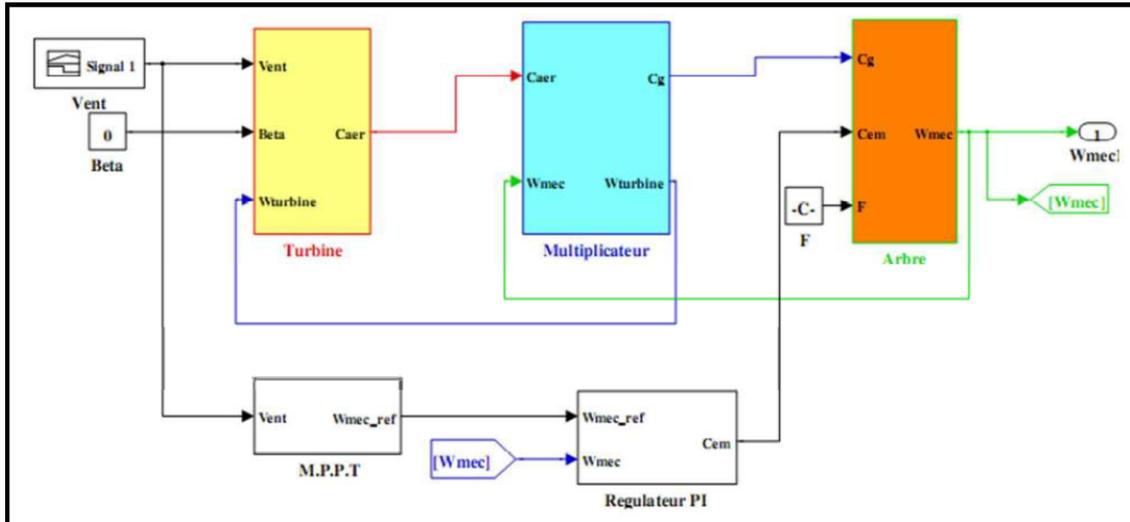


Figure II.27:modele de la turbine dans la zone 2 (M.P.P.T)

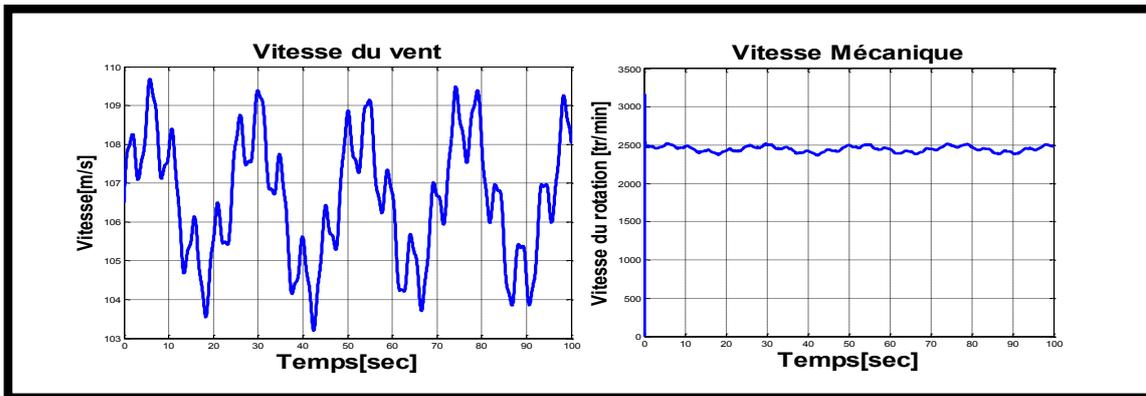


Figure II.28:Allure de vitesse : (a) de vent ; (b) Mécanique

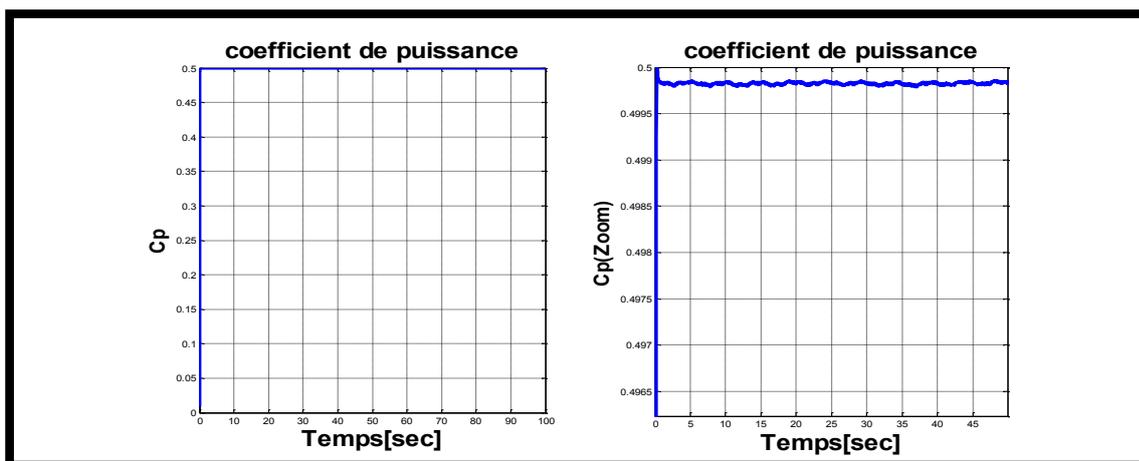
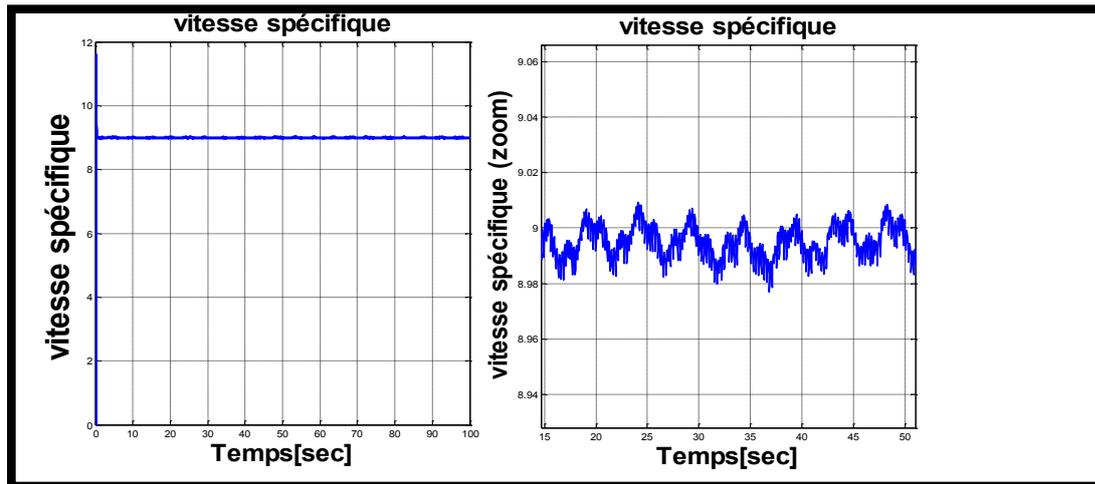


Figure II.29:le coefficient de puissance (Zone 2)

Figure II.30: la vitesse spécifique  $\lambda$ 

## II.9 La machine asynchrone à double alimentation

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

Intégrée dans un système éolien, la génératrice asynchrone à double alimentation permet de fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et d'en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Étant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est principalement la raison pour la quelle on trouve ce type de génératrice pour la production de forte puissance[37].

### II.9.1 Description de la machine asynchrone à double alimentation:

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone), il est constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquels viennent s'insérer des enroulements décalés de  $120^\circ$  dans l'espace. Son rotor est constitué de trois bobinages dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [41].

Ce type de machines nécessite une seule source d'alimentation qui peut alimenter les deux côtés de la machine et ceci constitue un avantage principal surtout dans les domaines d'application à vitesse

variable, de sorte que le glissement de la machine à double alimentation peut être contrôlé par l'association des convertisseurs de puissance du côté statorique ou rotorique ou bien des deux à la fois. Ceci dépend essentiellement du facteur technico-économique de construction.

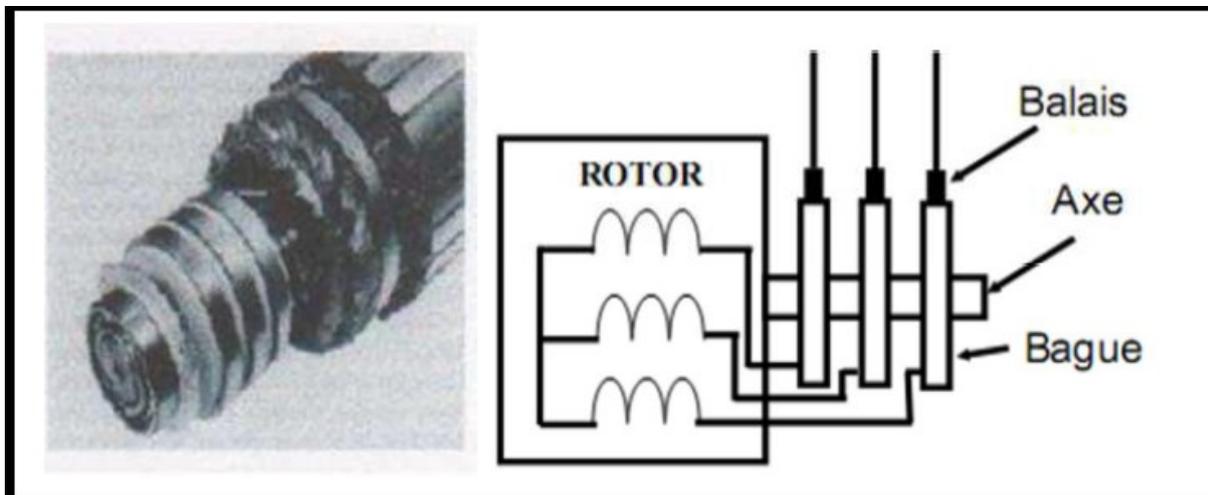


Figure 31: Structure de rotor bobinée

Cette machine peut fonctionner comme générateur ou moteur, le stator de la MADA connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un convertisseur statique figure (II.19)

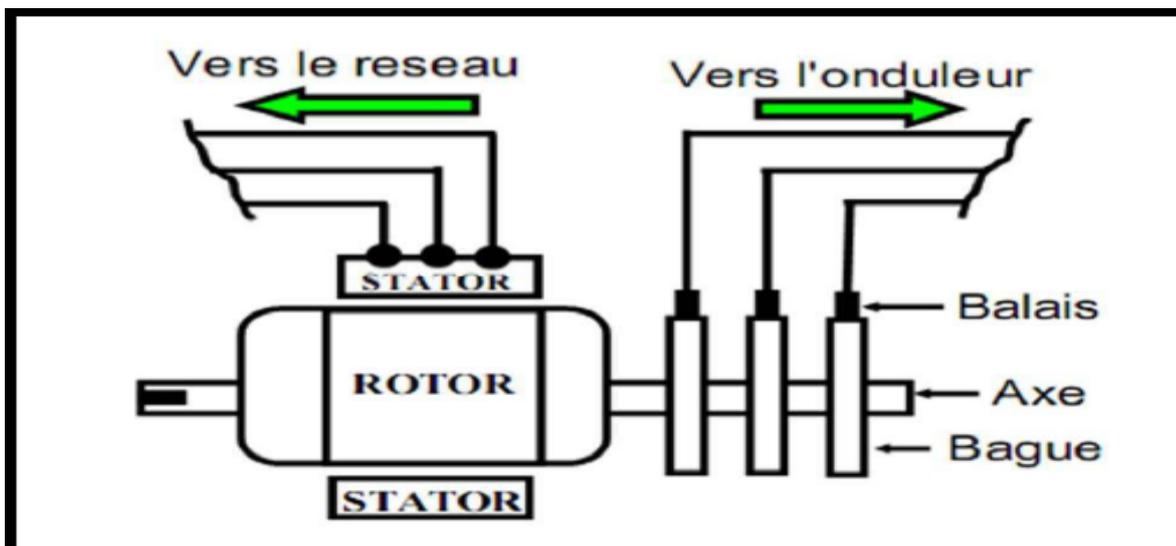


Figure 32: Structure d'une machine asynchrone à double alimentation

## II.9.2

### Mode de fonctionnement de la MADA:

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

Cette machine présente quatre modes de fonctionnement [38],[39],[40]:

- En moteur : Hypo ou hyper-synchrone
- En génératrice : Hypo ou hyper-synchrone

Contrairement à la machine à cage alimentée à fréquence fixe, ce n'est pas uniquement la vitesse de rotation qui impose le mode de fonctionnement mais la combinaison des fréquences de rotation, d'alimentation du rotor et du stator, et du signe de la puissance mécanique.

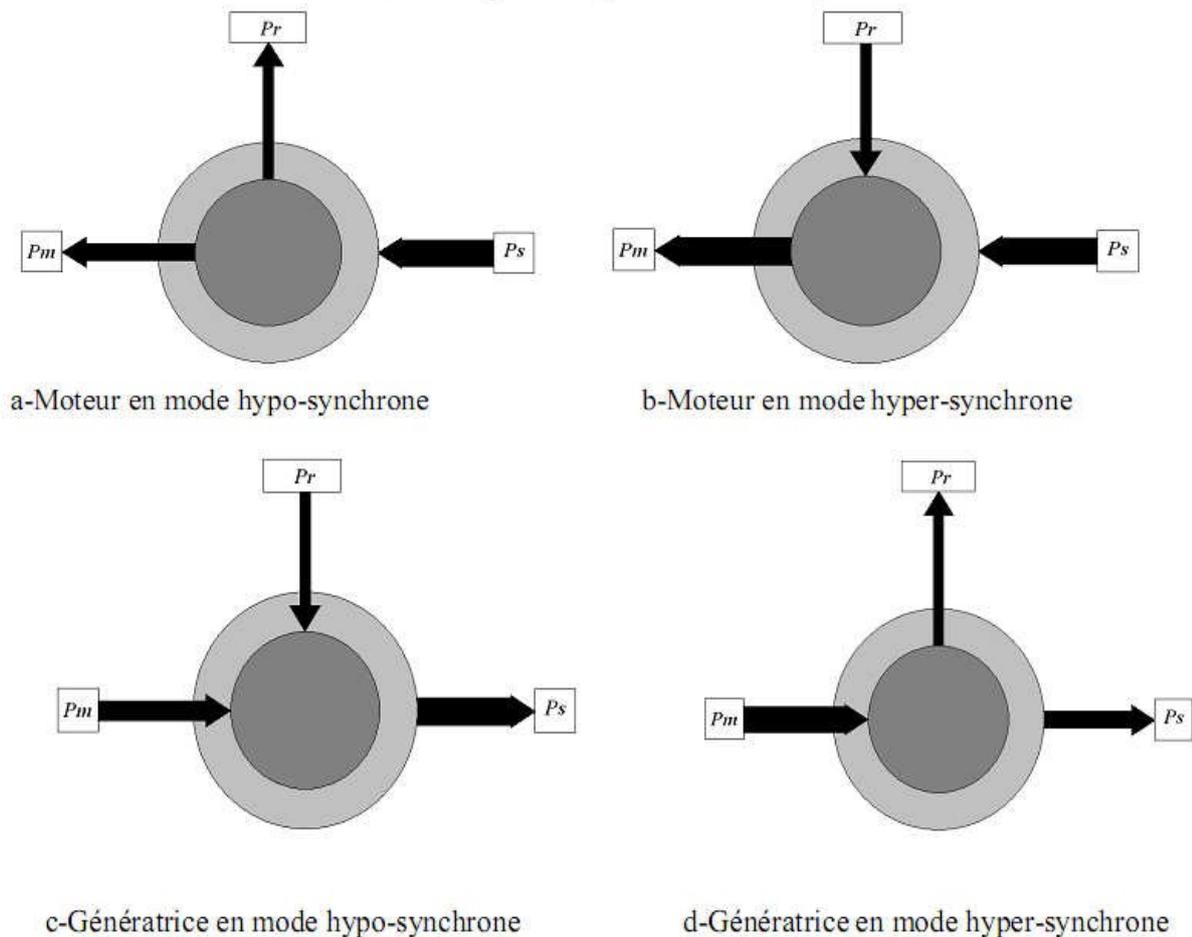


Figure II.33: Les quatre modes de fonctionnement d'une MADA

Où :

$P_s$  : Puissance statorique.

$P_r$  : Puissance rotorique.

$P_m$  : Puissance mécanique

a- Lorsque la machine tourne en dessous de la vitesse de synchronisme, la puissance électrique du stator est transformée en partie en puissance mécanique et le reste peut être réinjectée au réseau à travers le rotor. La MAS à cage peut fonctionner dans les mêmes conditions, sauf que cette puissance est dissipée dans le rotor sous forme de pertes Joules.

b- Lorsque la machine au dessus de la vitesse de synchronisme, elle peut recevoir de la puissance électrique du côté stator et du rotor. La MAS à cage ne peut pas fonctionner dans ce mode.

c- Lorsque la machine reçoit de la puissance du côté mécanique et du rotor, celle-ci tourne en dessous de la vitesse de synchronisme. La MAS à cage ne peut pas fonctionner dans ce mode.

d- Lorsque la machine tourne au dessus de la vitesse de synchronisme, la puissance mécanique est réinjectée au réseau à travers le stator et le rotor. La MAS à cage peut fonctionner dans les mêmes conditions, sauf que cette puissance est dissipée dans le rotor sous forme de pertes Joules.

## II.10 Domaine d'application de la MADA

Actuellement la machine asynchrone à double alimentation occupe une large place dans les applications industrielles, grâce à ces nombreux avantages. En effet, la MADA est très utilisée en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelables notamment dans les systèmes éoliens [41]. De plus le fonctionnement de générateur représente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée telles que :

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions.
- Les centrales hydrauliques à débit et vitesse variable.
- Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant .

La MADA peut être utilisée dans d'autres applications importantes nécessitant un fort couple de démarrage, telles que :

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines.
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime.
- Et enfin l'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges .....etc.

On note que les applications de la MADA en moteur sont relativement très limitées, parmi celles-ci on trouve principalement, la traction électrique et les systèmes de pompage.

## II.11 Avantages et inconvénients de la MADA :

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

### II.11.1 Avantages de la MADA

Comme avantages de la MADA, on peut citer :

- L'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance.

- La capacité de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme. De plus, l'application de la commande vectorielle associée à une technique de commande moderne permet d'obtenir un couple nominal sur une grande plage de vitesse.
- L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70 % en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques. Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.
- En fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse. Ce fonctionnement présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée [8],[42],[43],[44].

### II.11.2 Inconvénients de la MADA :

Tout d'abord, la MADA est une machine asynchrone ; alors le premier inconvénient est que sa structure est non linéaire, ce qui implique la complexité de sa commande. En plus de ça, on peut citer les inconvénients suivants :

- Le marché traditionnel est conquis par la MAS à cage, très étudiée et très connue, la nouveauté peut effrayer.
- Elle est plus volumineuse qu'une MAS à cage de puissance équivalente. L'aspect convertisseurs, augmente le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix. Nous utilisons un nombre des convertisseurs (parfois on utilise deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (toujours un redresseur et un onduleur).
- Un autre inconvénient apparaît lors de l'étude de cette machine, ce dernier est la stabilité notamment en boucle ouverte. En effet, dans le cas de la machine asynchrone conventionnelle celle-ci est garantie par la relation fondamentale de l'autopilotage réalisant l'asservissement de la vitesse par la fréquence du stator. Par conséquent, les deux forces magnétomotrices du stator et du rotor deviennent synchronisées. Mais dans le cas de la machine asynchrone à double alimentation, la rotation des forces magnétomotrices devient fonction des fréquences imposées par les deux sources d'alimentation externes. De ce fait, une certaine synchronisation entre elles est exigée afin de garantir une stabilité à la machine [8],[42],[43],[44].

### II.12 Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation .

Le modèle mathématique permet principalement d'observer les différentes évolutions des grandeurs électromécaniques d'une part, et d'autre part de prévoir le contrôle nécessaire pour pallier aux différents problèmes qui accompagnent les opérations de variation de charge, de vitesse ... etc .

La machine est alimentée en tension, les composantes du vecteur de commande de l'équation d'état seront donc des tensions. Les différentes grandeurs seront, dans un premier temps exprimées dans leurs repères respectifs :

La machine asynchrone à double alimentation comporte trois bobines statoriques décalées entre elles par un angle de  $(\frac{2\pi}{3})$ , et aussi trois bobines rotoriques identiques et similaires à celles du stator.

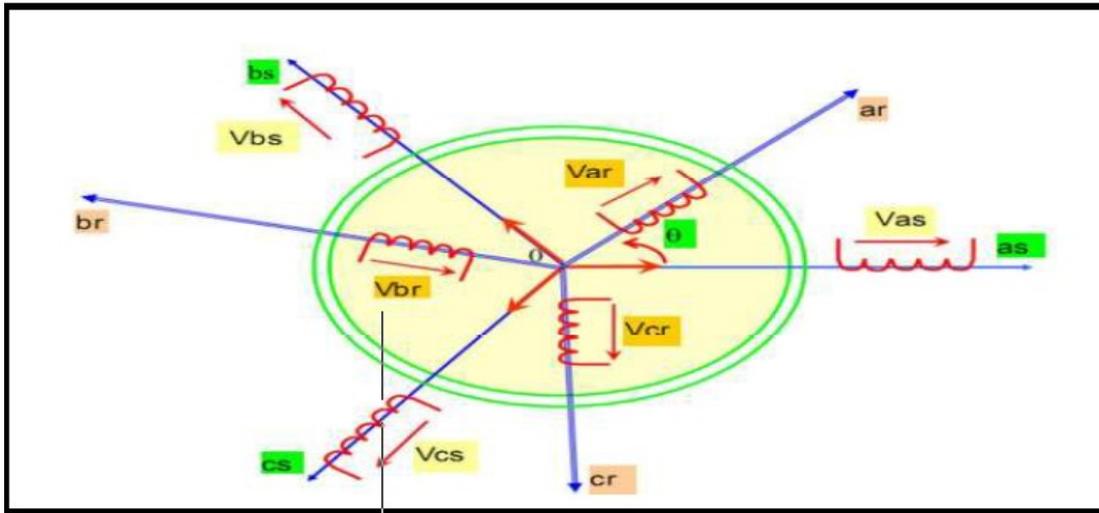


Figure 34: Représentation spatiale de la MADA

Avec :

$a_s, b_s, c_s$  : phases du stator.

$a_r, b_r, c_r$  : phases du rotor.

### II.12.1 Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone, avec la répartition de ses enroulements et sa géométrie, est très complexe pour se prêter à une analyse tenant compte de sa configuration exacte, il est alors nécessaire d'adopter des hypothèses simplificatrices [8]. Elles sont indispensables pour une réalisation technologique de la commande, mais elles écartent le modèle obtenu de la réalité du processus à représenter [41] :

- On suppose les circuits magnétiques non saturés, et suffisamment feuilletés pour que les pertes fer soient négligeables. Les relations entre les flux et les courants sont d'ordre linéaires.
- On considère une densité de courant uniforme dans la section des conducteurs élémentaires, l'effet de peau est donc négligé.
- Le phénomène d'hystérésis et les courants de Foucault sont négligés.
- Les enroulements statoriques et rotoriques sont symétriques et la f.é.m. est distribuée

sinusoïdalement le long de la périphérie des deux armatures.

- On ne tient compte que du premier harmonique d'espace de distribution de forcemagnétomotrice de chaque phase du stator et du rotor. L'entrefer est d'épaisseur uniforme(constant), les inductances propres sont constantes. Les inductances mutuelles sont des fonctions sinusoïdales de l'angle entre les axes des enroulements rotoriques et statoriques.
- On considère que la machine fonctionne en régime équilibré [8],[45],[46].

### II.12.2 Equations électriques et équations mécaniques

Dans le domaine de la modélisation des machines électriques il y a deux approches différents une première qui est basée sur le calcul des champs et qui demande sur moyen de calcul très puissant . Cette méthode s'adresse beaucoup plus au constructeur. Une deuxième approche est basée sur le modèle électromécanique ou on trouve plus de simplifications. Dans notre cas nous allons basée sue cette dernière .

#### II.12.2.1 Equations Electriques de la machine[4],[47],[48],[49]

La loi faraday et loi d'hom permette de relier les tensions des enroulements aux flux totalisés et aux courants dans les bobinages obéissent à l'équation suivante.

$$V= Ri + \frac{d\phi}{dt} \quad (II.19)$$

De là, on déduit celle des phases statoriques et rotoriques sous forme matricielle .

- Au niveau du stator

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \quad (II.15)$$

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{sabc}] \quad (II.16)$$

Et les équations des tensions rotoriques, peuvent être exprimées par

Avec :

$$[V_{rabc}] = [R_s][i_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{rabc}] \quad (II.17)$$

$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$  : Les tensions simples triphasées au stator .

$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  : Les courants statoriques.

$\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}$  : Les flux propres au stator.

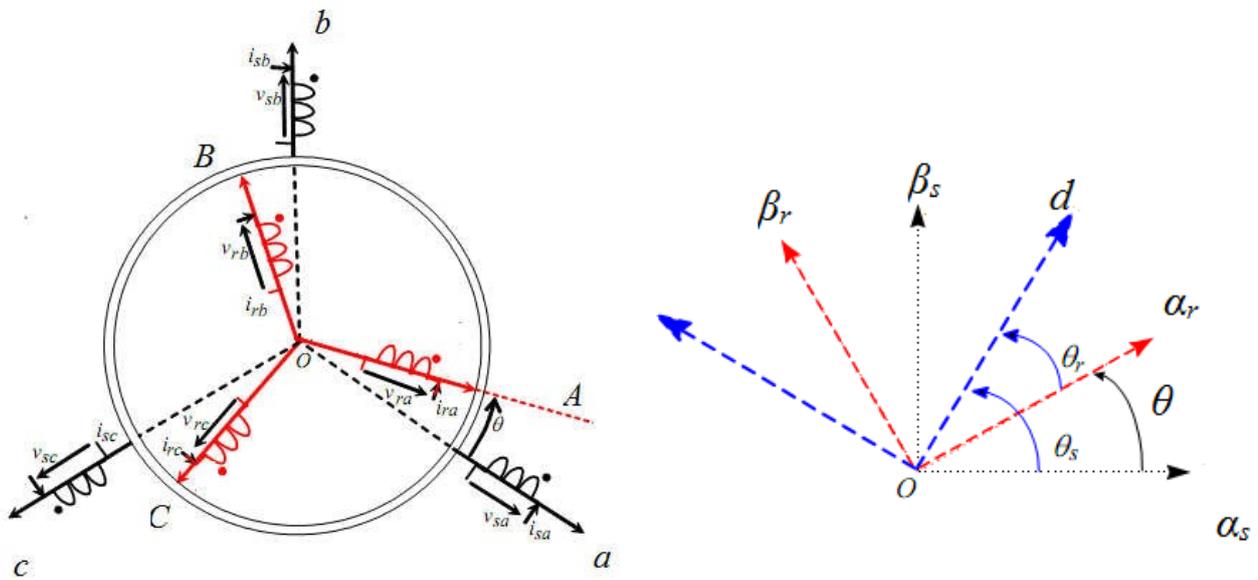
$V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$  : Les tensions simples triphasées au rotor .

$i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}$  : Les courants rotoriques.

$\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}$  : Les flux propres au rotor

$R_s$  : la résistance des enroulements statiprique.

$R_r$  : la résistance des enroulements rotorique



a) Enroulements de la MADA dans le repère naturel

b) Représentation dans le repère diphasé

Figure II.35: Représentation des enroulements de la MADA

### II.12.2.2 Equation magnétique

On définit le vecteur flux par :

$$[\phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \text{ Et } [\phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \phi_{ra} \\ \phi_{rb} \\ \phi_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

Les vecteurs courants par :

$$[i_{sabc}] = \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \text{ Et } [i_{rabc}] = \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Les flux statoriques et rotoriques instantanés par phase, sont donnés par :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sabc} \\ \Phi_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [L_r] & [M_{sr}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sabc} \\ i_{rabc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} I_s & M_s & M_s \\ M_s & I_s & M_s \\ M_s & M_s & I_s \end{bmatrix}, [L_r] = \begin{bmatrix} I_r & M_r & M_r \\ M_r & I_r & M_r \\ M_r & M_r & I_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

$$[M_{SR}] = [M_{RS}]^t = M_{SR} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{4\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$L_s$  : L'inductance propre d'une phase statorique.

$M_s$  : L'inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

$L_r$  : L'inductance propre d'une phase rotorique.

$M_r$  : L'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques.

$M_{sr}$  : L'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

### II.12.2.3 Equation mécanique

II.12.2.1 Le couple électromagnétique est donné par :

$$C_{em} = P [I_s] \left( \frac{d}{d\theta} [M_{sr}] \right) [I_r] \quad (\text{II.23})$$

Avec :  $P$  est le nombre de pair de pôles.

L'équation dynamique est donnée par :

$$J \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{em} - C_r - f \Omega_{méc} \quad (\text{II.29})$$

Avec :

$J$  : l'inertie de la machine.

$C_r$  : le couple résistant.

$f$  : le coefficient de frottement visqueux.

**II.12.3 Application de la transformation de park :**

La transformation de Park, définie par la matrice de rotation  $[P(\theta)]$ , permet de ramener les variables du repère triphasé(a,b,c) sur les axes d'un repère diphasé tournant (d,q,o). les grandeurs statoriques et rotoriques sont alors exprimées dans un même repère figure (II.23)

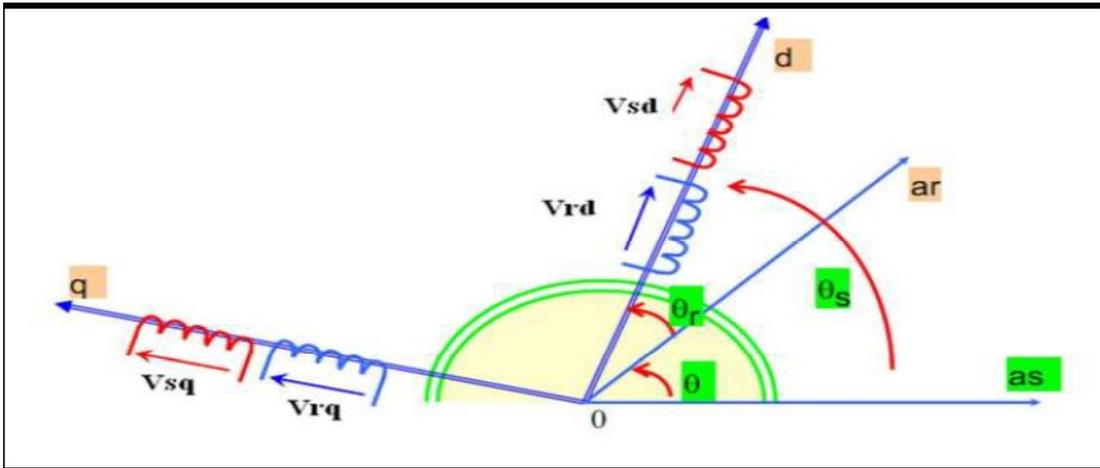


Figure II.36: Transformation de park

Revenons au choix de ces angles de transformation pour chaque ensemble de grandeurs (statoriques et rotoriques). Si l'on note par  $\theta_s$  (respectivement par  $\theta_r$ ) l'angle de la transformation de park des grandeurs statoriques (respectivement rotorique). On remarque sur la figure que  $\theta_s$  et  $\theta_r$  sont naturellement liés à  $\theta$  par la relation rigide.

$$\theta_s - \theta_r = \theta \tag{II.24}$$

La matrice de changement de base  $[P(\theta_s)]$  définie par :

$$[p(\theta_s)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta_s & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin\theta_s & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{II.25}$$

Et son inverse est défini par :

$$[p(\theta_s)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta_s & -\sin(\theta_s) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \tag{II.26}$$

On ainsi que :

$$[i_{dqo}] = [p(\theta_s)][i_{abc}] \quad (\text{II.27})$$

$$[V_{dqo}] = [p(\theta_s)][V_{abc}] \quad (\text{II.28})$$

$$[\Phi_{dqo}] = [p(\theta_s)][\Phi_{abc}] \quad (\text{II.29})$$

La matrice  $[p(\theta_s)]$  représente la matrice de transformation appliquée au stator la transformation des grandeurs rotoriques s'obtient en remplaçant l'indice (s) par l'indice (r).

## II.12.4 Modélisation de la machine asynchrone dans le repère de Park :

### II.12.4.1 Equation électrique :

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{sabc}] \quad (\text{II.30})$$

La transformation linéaire  $[p(\theta_s)]$  appliquée à l'équation (II. 31)

$$[p(\theta_s)]^{-1}[V_{sdqo}] = [R_s][p(\theta_s)]^{-1}[i_{sdqo}] + \frac{d}{dt} ([p(\theta_s)]^{-1}[\Phi_{sdqo}]) \quad (\text{II.31})$$

Soit en multipliant à gauche par  $[p(\theta_s)]$

$$[V_{sdqo}] = [R_s][i_{sdqo}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sdqo}] + [p(\theta_s)] \frac{d}{dt} ([p(\theta_s)]^{-1})[\Phi_{sdqo}] \quad (\text{II.32})$$

On démontre que :

$$[p(\theta_s)] \frac{d}{dt} ([p(\theta_s)]^{-1}) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} (\theta_s) \quad (\text{II.39})$$

On obtient les équations électriques suivantes.

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \quad (\text{II.33})$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd}$$

$$V_{so} = R_s i_{so} + \frac{d\Phi_{so}}{dt}$$

Ou :

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt} \quad (\text{II.34})$$

$$V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \phi_{rq} \quad (\text{II.35})$$

$$V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \phi_{rd}$$

De façon analogue, la transformation des grandeurs rotoriques conduit au système :

Ou :

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (\text{II.36})$$

#### II.12.4.2 Equation magnétique :

Les transformations proposées établissent les relations entre les flux d'axes (d ,q ,o) et les flux d'axes (a ,b ,c) :

$$[\phi_{sdqo}] = [p(\theta_s)][\phi_{sabc}] \text{ et } [\phi_{rdqo}] = [p(\theta_r)][\phi_{rabc}] \quad (\text{II.37})$$

En développant les expressions des flux, elles deviennent au :

➤ Au niveau du stator

$$[\phi_{sdqo}] = [p(\theta_s)][L_s][i_{sabc}] + [M_{SR}][i_{rabc}] \quad (\text{II.38})$$

Soit :

$$[\phi_{sdqo}] = [p(\theta_s)][L_s][p(\theta_s)]^{-1}[i_{sdqo}] + [p(\theta_s)][M_{SR}][p(\theta_r)]^{-1}[i_{rdqo}] \quad (\text{II.39})$$

➤ Au niveau du rotor

$$[\phi_{rdqo}] = [p(\theta_r)][M_{SR}][i_{sabc}] + [L_r][i_{rabc}] \quad (\text{II.40})$$

Soit :

$$[\phi_{rdqo}] = [p(\theta_r)][M_{SR}][p(\theta_s)]^{-1}[i_{sdqo}] + [p(\theta_r)][L_r][p(\theta_r)]^{-1}[i_{rdqo}] \quad (\text{II.41})$$

$$[p(\theta_s)][L_s][p(\theta_s)]^{-1} = \begin{bmatrix} l_s - M_s & 0 & 0 \\ 0 & l_s - M_s & 0 \\ 0 & 0 & l_s - 2M_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.49})$$

$$[p(\theta_s)][M_{SR}][[p(\theta_r)]^{-1}] = \frac{3}{2} M_{SR} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.42})$$

On définit :

$l_s - M_s$  : L'inductance cyclique statorique.

$M = \frac{3}{2} M_{SR}$  : L'inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

$L_s = l_s + 2M_s$  : L'inductance homopolaire statorique .

Ainsi l'expression des flux totalisés prend la forme suivante :

$$\begin{aligned} \Phi_{sd} &= L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ \Phi_{sq} &= L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq} \\ \Phi_{so} &= L_s i_{so} \end{aligned} \quad (\text{II.43})$$

On obtient de la même manière pour le rotor :

$$\begin{aligned} \Phi_{rd} &= L_r i_{rd} + M_{sr} i_{sd} \\ \Phi_{rq} &= L_r i_{rq} + M_{sr} i_{sq} \\ \Phi_{ro} &= L_r i_{ro} \end{aligned} \quad (\text{II.44})$$

Avec :

$L_r = l_r - M_r$  : L'inductance cyclique rotorique.

$L_{ro} = l_r + 2M_r$  : L'inductance homopolaire rotorique .

Quand les sommes des composantes (a , b , c ) sont nulles, la troisième équation toujours vérifiée car identiquement nulle.

Les équations de Park, statoriques et rotoriques s'écrivent :

$$\begin{aligned} V_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \\ V_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} &= R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \phi_{rq} \\ V_{rq} &= R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \phi_{rd} \end{aligned} \quad (\text{II.45})$$

Les flux sont donnés dans le système :

$$\begin{aligned}\Phi_{sd} &= L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ \Phi_{sq} &= L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq} \\ \Phi_{rd} &= L_r i_{rd} + M_{sr} i_{sd} \\ \Phi_{rq} &= L_r i_{rq} + M_{sr} i_{sq}\end{aligned}\quad (\text{II.46})$$

### II.12.5 Choix du référentiel

Les équations de la machine asynchrone triphasée peuvent être exprimées dans différentes référentielles. Le choix d'un référentiel se fait selon le problème étudié[5] :

#### II.12.5.1 Référentiel lié au stator

Ce référentiel est le mieux adapté pour travailler avec les grandeurs instantanées. Il est utilisé en vue d'étudier les variations importantes de la vitesse de rotation. Aussi il est préférable lors de l'étude des grandeurs statoriques[5].

Il se traduit par les conditions :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0, \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_r}{dt} = -\omega_r \quad (\text{II.47})$$

Les équations électriques prennent la forme :

$$\begin{aligned}V_{sd} &= R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} &= R_s i_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} \\ V_{rd} &= R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - \omega_r \Phi_{rq} \\ V_{rq} &= R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + \omega_r \Phi_{rd}\end{aligned}\quad (\text{II.48})$$

#### II.12.5.2 Référentiel lié au rotor

Ce référentiel est intéressant pour les problèmes des régimes transitoires ou la vitesse de rotation est considérée comme constante[5].

Il est avantageux pour l'étude des grandeurs statoriques. Il se traduit par la relation :

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0, \quad \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega \quad (\text{II.49})$$

Et les équations de tension deviennent :

$$V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \Phi_{sq} \omega_s \quad (\text{II.50})$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \phi_{sd} \omega_s$$

$$V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt}$$

$$V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt}$$

### II.12.5.3 Référentiel lié au champ tournant

Il se traduit par :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s, \quad \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega \quad (\text{II.59})$$

Ce type de référentiel est souvent utilisé dans l'étude de l'alimentation des moteurs à fréquence variable. Son modèle permet d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent d'où la facilité de régulation. Il est donc préférable de travailler dans ce repère lors d'une étude de la commande des machines.

Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation s'écrit dans le repère de Park lié au champ tournant comme suit[5] :

$$[V_{ds}] = [R_s][i_{ds}] + \frac{d}{dt}[\phi_{ds}] - \omega_s - \phi_{qs} \quad (\text{II.51})$$

$$[V_{qs}] = [R_s][i_{qs}] + \frac{d}{dt}[\phi_{qs}] - \omega_s - \phi_{ds}$$

$$[V_{dr}] = [R_r][i_{dr}] + \frac{d}{dt}[\phi_{dr}] - (\omega_s - \omega)\phi_{qr} \quad (\text{II.52})$$

$$[V_{qr}] = [R_r][i_{qr}] + \frac{d}{dt}[\phi_{qr}] - (\omega_s - \omega)\phi_{dr}$$

$$C_{em} = P \frac{M}{L_r} (\phi_{dr} i_{qr} - \phi_{qr} i_{ds}) \quad (\text{II.53})$$

$$\frac{J}{P} \frac{d}{dt} \omega = C_{em} - C_r - C_f \quad (\text{II.54})$$

### II.12.6 Mise sous forme d'équations d'état

Pour la machine asynchrone à double alimentation les variables de contrôle sont les tensions statoriques et rotoriques . On considérant les flux statoriques et les courants statoriques comme des vecteurs d'état, alors le modèle de la MADA et d'écrit par les équations suivantes : pour une bonne représentation de la machine asynchrone à double alimentation ,nous considérons comme variable d'état les flux statoriques ( $\phi_{sd}$  et  $\phi_{sq}$ ),les courants rotoriques( $i_{rd},i_{rq}$  ) et la vitesse de rotation  $\omega$ . Le système d'équation présentant la machine dans la repère (d-q ) lié au champ tournant à la vitesse de synchronisme  $\omega_s$  a l'aide des expressions de système d'équation (II.53) (II.54) et (II.63) nous obtenons le modèle de la machine à double alimentation suivant[5].

$$\begin{aligned} \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \frac{R_s}{L_s} \phi_{sd} + \omega_s \phi_{sq} + \frac{R_s M_{sr}}{L_r} i_{rd} + V_{sd} & \quad (II.55) \\ \frac{d\phi_{sq}}{dt} - \omega_s \phi_{sd} - \frac{R_s}{L_s} \phi_{sq} + \frac{R_s M_{sr}}{L_r} i_{rq} + V_{sq} & \\ \frac{di_{rd}}{dt} - \frac{R_s M_{sr}}{\sigma L_r L_s^2} \phi_{sd} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_r L_s} \phi_{sq} - \left[ \frac{R_r}{\sigma L_r} + \frac{R_s M_{sr}^2}{\sigma L_r L_s^2} \right] i_{rd} + (\omega_s - \omega) i_{rq} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_r L_s} V_{sd} + & \\ \frac{1}{\sigma L_r} V_{rd} & \\ \frac{di_{rq}}{dt} - \frac{M_{sr}}{\sigma L_r L_s} \omega \phi_{sd} + \frac{R_s M_{sr}}{\sigma L_r L_s^2} \phi_{sq} - (\omega_s - \omega) i_{rd} - \left[ \frac{R_r}{\sigma L_r} + \frac{R_s M_{sr}^2}{\sigma L_r L_s^2} \right] i_{rq} - & \\ \frac{M_{sr}}{\sigma L_r L_s} V_{sq} + \frac{1}{\sigma L_r} V_{rq} & \\ \frac{d\omega}{dt} - \frac{P^2 M_{sr}}{L_s J} (\phi_{sq} i_{rd} - \phi_{sd} i_{rq}) - \frac{P}{J} C_r - \frac{f}{J} \omega & \end{aligned}$$

Ou

$\sigma$  est le coefficient de dispersion de blondel :  $(\sigma = 1 - \frac{M_{sr}^2}{L_r L_s})$

### II.12.7 Simulations

Essayons de valider maintenant le modèle de la machine asynchrone doublement alimentée décrit par les équations trouvées avec la transformation de Park liée au champ tournant citées auparavant.

Les paramètres de la MADA utilisée sont cités à ( l'annexe A).

#### II.12.7.1 Conditions de la simulation

En premier temps aucune charge n'est appliquée. La machine est entraînée par une vitesse près du synchronisme égale à 1350tr/min ;

La MADA utilisée est de 1.5MW de puissance alimentée directement par une source de tension de 690V à 50Hz et de 25V à 5Hz au stator et au rotor respectivement.

### II.12.7.2 Résultats obtenus

La figure (II.24) représente la tension d'alimentation statorique et rotorique sur deux périodes.

La figure (II.25) représente la composante directe et quadratique de flux statorique.

La figure (II.26) représente la composante directe et quadratique de flux rotoriques.

La figure (II.27) représente la composante directe et quadratique de courant rotorique.

La vitesse mécanique est représentée sur la figure (II.28).

En fin on représente le couple électromagnétique développé par la machine sur la figure (II.29).

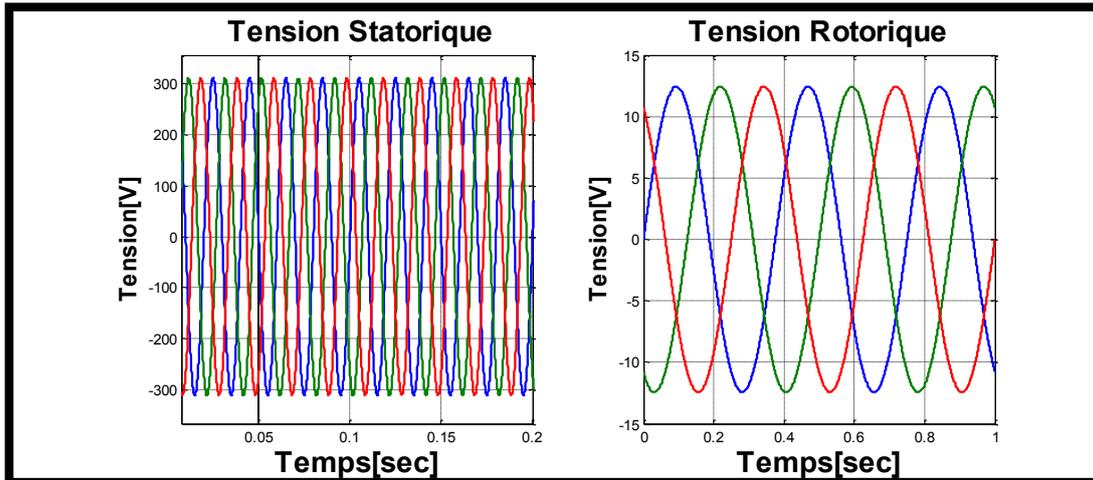


Figure II.37: Zoom de la tension statorique et rotorique sur deux périodes

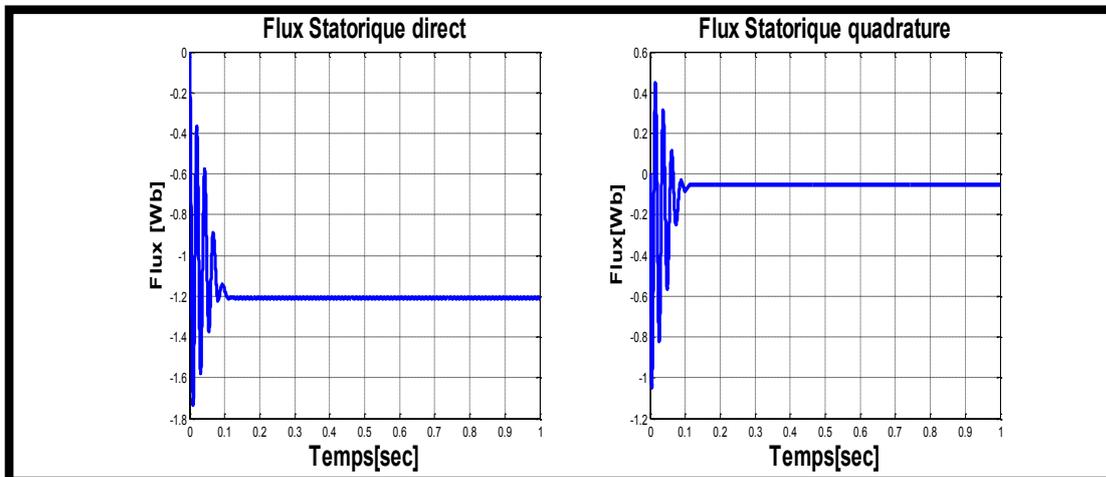


Figure II.38: La composante directe et en quadrature du flux statorique.

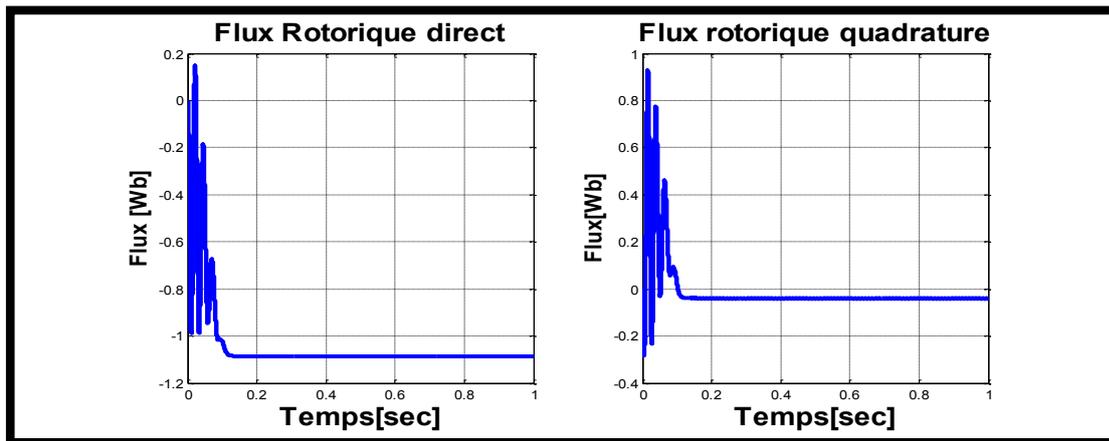


Figure II.39: La composante directe et en quadrature du flux Rotorique.

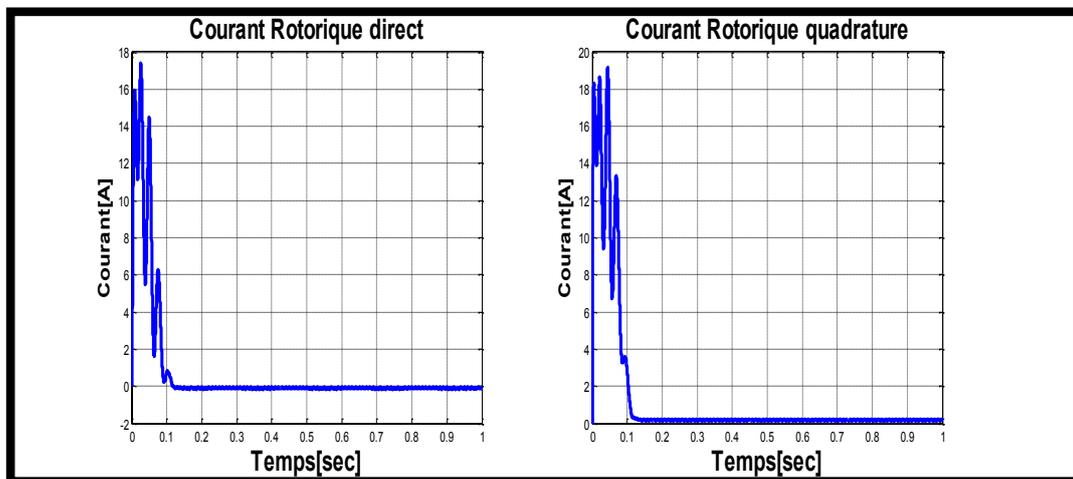


Figure II.40: La composante directe et en quadrature du Courant Rotorique.

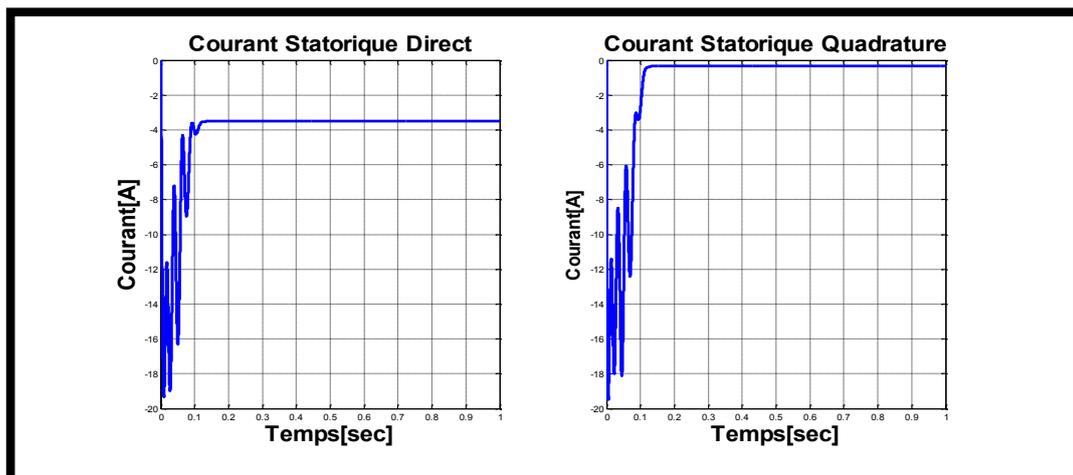


Figure II.41: La composante directe et en quadrature du Courant Statorique

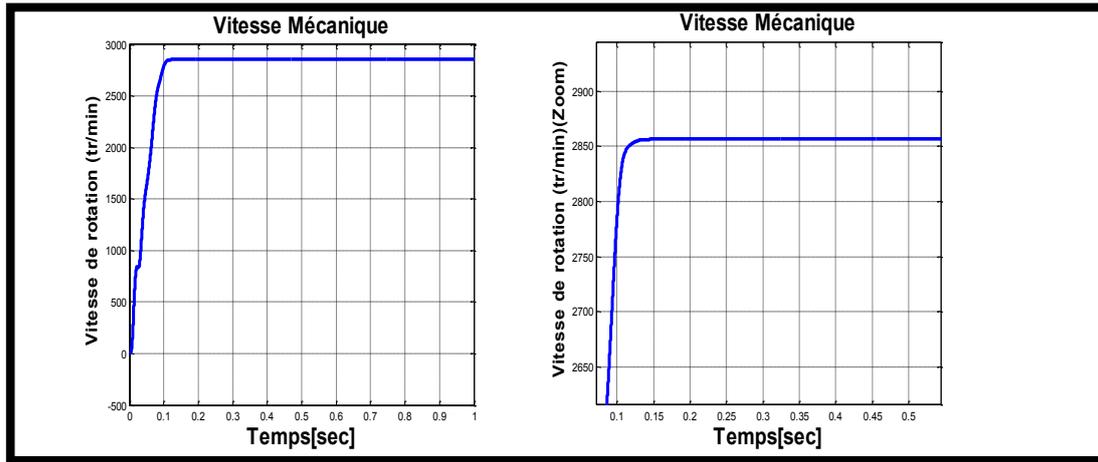


Figure II.42:La Vitesse Mécanique

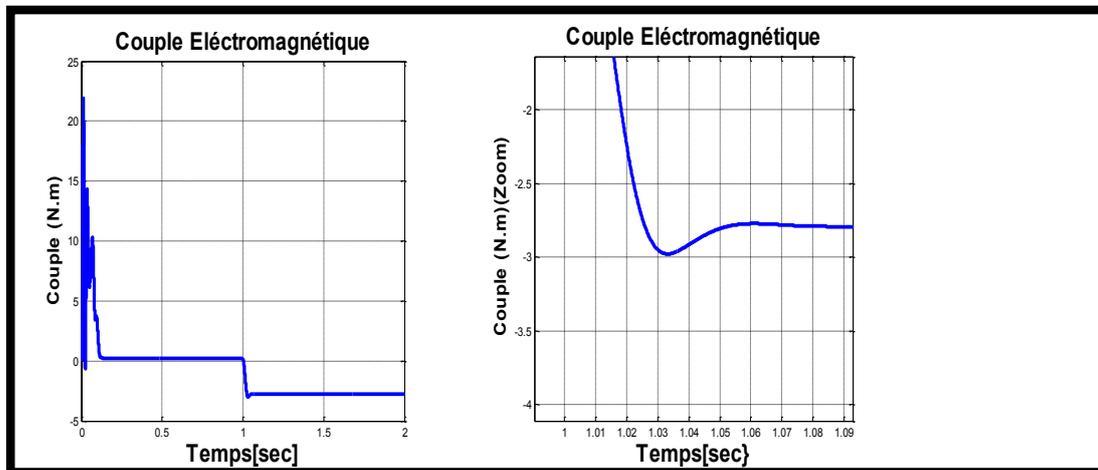


Figure 43:Le couple Electromagnétique.

**II.12.7.3 Interprétation :**

La simulation effectuée au départ d'un démarrage à vide. On remarque que le régime transitoire et oscillatoire pour toutes les grandeurs de la machine.

L'analyse des courbes représente l'évolution des flux statoriques signalant que ces flux ( $\phi_{sd}$ ,  $\phi_{sq}$ ,  $\phi_s$ ) prennent tous des régimes transitoires oscillatoires.

Pendant la phase de démarrage, les courants rotoriques ( $I_{rd}$ ,  $I_{rq}$ ) sont fortement oscillatoires, leur valeur dépasse (16A). De telles valeurs peuvent causer la destruction de la machine par échauffement en cas d'un démarrage répété. En régime permanent, ces courants rotoriques stabilisent à des valeurs proches de zéro au bout d'un temps égal à 0.1s.

Après un régime transitoire on constate que le comportement de la vitesse de la MADA à vide atteint sa valeur crête proche de 2860 tr/min au bout d'un temps égal à 0.1s.

La courbe représente des variations des couples électromagnétiques montre que l'amplitude de couple atteint une valeur avoisine de (22N.m) pendant la phase de démarrage. Puis se stabilise à une valeur proche de (-2.78N.m) cette valeur est défini par le couple de frottement de la machine après que le régime permanent s'est établi. On applique un couple de charge à la machine  $C_r = -3\text{N.m}$  dans un instant ( $t=1\text{s}$ ).

On observe des application du couple résistant que le couple électromagnétique augmente afin de compenser le couple résistant ; cette augmentation induit une légère diminution de la vitesse qui traduit un glissement supplémentaire correspondant au glissement nominale de la machine, et une augmentation du courant rotorique.

Comme on peut souligner un autre point important, s'est la variation notée au niveau du flux l'ors de l'application du couple résistant ceci met en évidence le couplage naturel existant entre le flux et le couple.

Nous avons constaté sur l'ensemble des figures représentées, que la machine présente un régime de démarrage lent et avec des dépassements plus importants , ce qui nécessite introduction d'une commande pour améliorer les performances dynamiques de la machine.

### **II.13 Commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation :**

Dans le but de faire translater les performances de la machine à courant continu à excitation séparée à la machine asynchrone, Blashke et Hasse ont proposé une méthode du contrôle vectoriel de la machine asynchrone. La commande vectorielle dite aussi « commande à flux orienté» est d'une importance majeure puisqu'elle résout les problèmes du couplage des variables de la machine [50].

#### **II.13.1 Stratégie de commande de la MADA**

Ilà été montré dans la partie précédente que l'utilité de la MADA est permettre le fonctionnement à vitesse variable, ceci est nécessaire pour extraire le maximum de puissance à partir du vent et ainsi augmenter le rendement de la machine. Pour avoir un fonctionnement à vitesse de rotation donnée correspondant à une vitesse de vent, Il faut que la machine impose un couple résistant permettant ce fonctionnement. Etant donné que la puissance est le produit de la vitesse et du couple il suffit d'avoir une référence de puissance qu'il faut suivre pour fonctionner à vitesse optimale. Ainsi une commande vectorielle de la MADA sera réalisée, celle-ci sera détaillée dans la suite de notre travail.

### II.13.2 Principe de la commande vectorielle de la MADA

la commande d'une machine à courant alternatif est effectuée en général par deux techniques, l'une classique (commande scalaire), et l'autre moderne (commande vectorielle). Dans les applications nécessitant des performances dynamiques importantes, il faut pouvoir agir directement sur le couple instantané. C'est facile pour la machine à courant continu, où la force magnétomotrice de l'induit établit un angle droit avec l'axe du flux inducteur, et ceci quel que soit la vitesse de rotation, ainsi le couple est proportionnel au produit du flux inducteur et du courant d'induit. Si la machine est excitée séparément, et l'on maintient le flux inducteur constant, le couple est directement proportionnel au courant d'induit, on obtient donc de bonnes performances dynamiques puisque le couple peut être contrôlé rapidement que le courant d'induit peut l'être. Par contre, dans une machine asynchrone, l'angle entre le champ tournant du stator et celui du rotor varie avec la charge, il en résulte des interactions

complexes et des réponses dynamiques oscillatoires. Pour obtenir une situation équivalente à celle de la machine à courant continu, on introduit la technique de la commande vectorielle pour la machine asynchrone, le principe d'orientation du flux a été développé par BLASCHKE au début des années 70. Il consiste à orienter le vecteur courant et le vecteur flux afin de rendre le comportement de cette machine similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée. Le référentiel diphasé choisi est celui lié au champ tournant. L'avantage d'utiliser ce référentiel est d'avoir des grandeurs constantes en régime permanent [51]. Il est alors plus aisé d'en faire la régulation. Afin de simplifier la commande de la machine, le vecteur flux statorique  $\phi_s$  est aligné avec l'axe « d » du repère diphasé Figure (II.30), d'où :

$$\begin{aligned}\phi_{ds} &= \phi_s \\ \phi_{qs} &= 0\end{aligned}\tag{II.56}$$

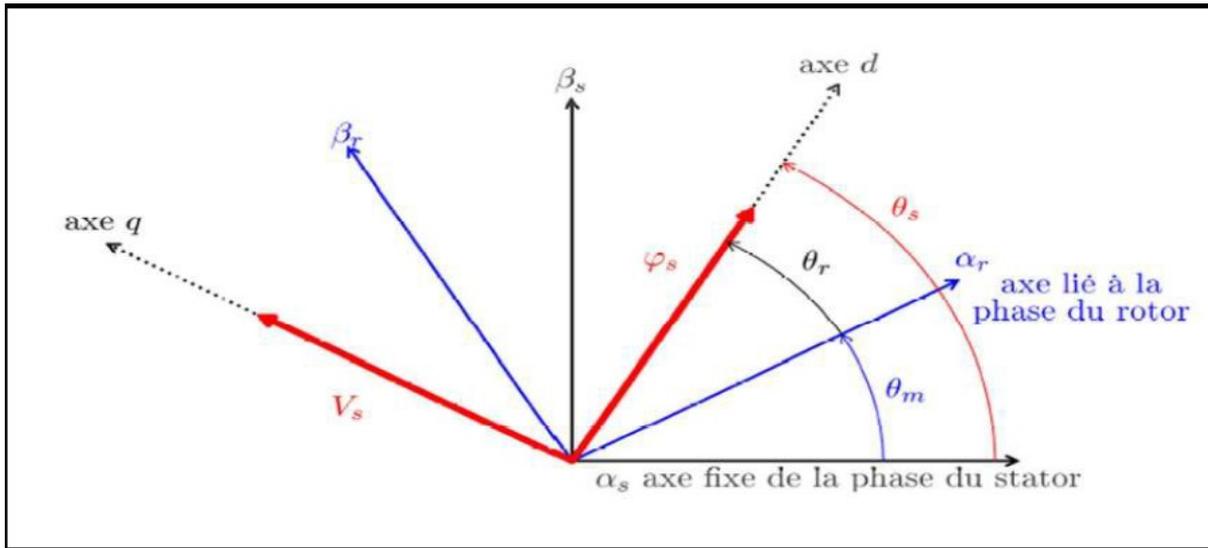


Figure II.44: Vecteur courant et flux dans le système d'axe choisi

### II.13.3 Variantes de la commande vectorielle

La commande à flux orienté appliquée aux moteurs électriques est utilisée pour obtenir le mode de fonctionnement recherché en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants. Des nombreuses variantes de ce principe de commande ont été présentés dans la littérature, que l'on peut classer [2],[43],[52] :

- Suivant la source d'énergie :
  - Commande en tension (Voltage Source Inverter).
  - Commande en courant (Current Controlled Inverter)
- Suivant les opérations désirées pour le flux :
  - Commande vectorielle de flux rotorique
  - Commande vectorielle de flux statorique
  - Commande vectorielle de flux entrefer (ou de flux magnétisant)
- Suivant la détermination de la position de flux :
  - Directe par mesure ou observation du vecteur de flux (module, phase)
  - Indirecte par contrôle de la fréquence de glissement.

### II.13.4 Procédé d'orientation du flux

La méthode du flux orienté est basée sur le choix du repère de référence. Par le choix du repère lié au champ tournant, il découle que le flux à orienter statorique, rotorique ou d'entrefer doit coïncider avec l'axe « d ». Afin d'obtenir un couple maximal, nous devons imposer l'une des conditions suivantes [2],[5] :

**II.13.4.1 Orientation du flux rotorique :**

$$\Phi_{rd} = \Phi_r \quad (\text{II.57})$$

$$\Phi_{rq} = 0$$

**II.13.4.2 Orientation du flux statorique :**

$$\Phi_{sd} = \Phi_s \quad (\text{II.58})$$

$$\Phi_{sq} = 0$$

**II.13.4.3 Orientation du flux magnétisant :**

$$\Phi_d = \Phi \quad (\text{II.59})$$

$$\Phi_q = 0$$

Avec :

$\Phi_{rd}$  : flux rotorique .

$\Phi_{sd}$  : flux statorique .

Dans le cadre de cette thèse, nous développons la commande vectorielle de la machine asynchrone à double alimentation avec l'orientation du repère (d,q) suivant le flux statorique.

**II.13.5 Orientation du flux statorique**

On rappelle d'abord le système équations différentielles de la machine[1].

$$[V_{dr}] = [R_r][i_{dr}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{dr}] - (\omega_s - \omega)\Phi_{qr} \quad (\text{II.69})$$

$$[V_{qr}] = [R_r][i_{qr}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{qr}] + (\omega_s - \omega)\Phi_{dr}$$

$$[V_{ds}] = [R_s][i_{ds}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{ds}] - \omega_s \Phi_{qs} \quad (\text{II.70})$$

$$[V_{qs}] = [R_s][i_{qs}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{qs}]$$

Nous utilisons la modélisation diphasé de la machine asynchrone à double alimentation on oriente le repère (d, q) afin que l'axe d soit aligné sur le flux statorique  $\Phi_s$ .

Avec un flux statorique constant et orienté  $\Phi_s = \Phi_{sd}$  et  $\Phi_{sq} = 0$ , ces équations peuvent se simplifier sous la forme suivant[53],[54] :

$$[V_{ds}] = [R_s][i_{ds}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{ds}] \quad (\text{II.60})$$

$$[V_{qs}] = [R_s][i_{qs}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{qs}] + \omega_s \Phi_{ds}$$

$$[V_{dr}] = [R_r][i_{dr}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{dr}] - (\omega_s - \omega)\Phi_{qr} \quad (\text{II.61})$$

$$[V_{qr}] = [R_r][i_{qr}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{qr}] + (\omega_s - \omega)\Phi_{dr}$$

$$V_{sd} = R_s i_{sd} \quad (\text{II.62})$$

$$V_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \Phi_s$$

$$V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega)\Phi_{rq}$$

$$V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega)\Phi_{rd}$$

Dans le repère triphasé a ,b,c, la tension aux bornes d'une phase n du stator s'exprime par la relation générale :

$$V_{ns} = R_s i_{ns} + \frac{d}{dt} \Phi_{ns} \quad (\text{II.63})$$

$R_s$  :Etant négligeable pour les machines de forte puissance utilisées dans les turbines éoliennes[1], l'expression de la tension statorique devient alors :

$$V_{ns} = \frac{d}{dt} \Phi_{ns} \quad (\text{II.64})$$

Cette relation montre qu'un repère lié au flux statorique tourne alors à la même vitesse angulaire que le vecteur tension statorique et qu'il est en avance de (1/2) sur ce même vecteur. Alors les équations des tensions de la machine se réduisent à la forme suivante[4] ,[55],[56] :

$$V_{sd} = 0 \quad (\text{II.65})$$

$$V_{sq} = V_s = \omega_s \Phi_s$$

$$V_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} - (\omega_s - \omega)\Phi_{rq}$$

$$V_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega)\Phi_{rd}$$

De la même manière que pour les tensions, les équations des flux deviennent :

$$\Phi_s = L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \quad (\text{II.66})$$

$$0 = L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq}$$

$$\Phi_{rd} = L_r i_{rd} + M_{sr} i_{sd}$$

$$\Phi_{rq} = L_r i_{rq} + M_{sr} i_{sq}$$

L'expression du couple électromagnétique devienne alors :

$$C_{em} = -P \frac{M_{sr}}{L_r} \Phi_s i_{rq} \quad (\text{II.67})$$

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'énergie par la MADA, il est pratique de d'élaborer un modèle pour le contrôle indépendant des puissances actives et réactive. Un tel modèle peut être élaborer en établissant les relations qui lient les puissances active et réactive aux courants et tension rotoriques imposés par l'onduleur.

### II.13.6 Relation entre le courant statorique et le courant rotorique

$$i_{sd} = \frac{V_s}{\omega_s L_s} - \frac{M_{sr}}{L_s} i_{rd} \quad (\text{II.79})$$

$$i_{sq} = - \frac{M_{sr}}{L_s} i_{rq}$$

### II.13.7 Expressions des puissances actives et réactives statorique

Les puissances actives et réactive statorique, dans le repère orthogonal, s'écrivent

$$P = v_{sd} i_{sd} + v_{sq} i_{sq} \quad (\text{II.68})$$

$$Q = v_{sq} i_{sd} - v_{sd} i_{sq}$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équation peut se simplifier sous la forme :

$$P = V_s i_{sq} \quad (\text{II.69})$$

$$Q = V_s i_{sd}$$

En remplaçant les courants statorique directe et quadrature par leurs expressions dans les équations des puissances active et réactive, On trouve :

$$P = - \frac{V_s M_{sr}}{L_s} i_{rq} \quad (\text{II.70})$$

$$Q = - \frac{V_s M_{sr}}{L_s} i_{rd} + \frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$$

Il ressort de l'expression (II.71) que le contrôle des puissances active et réactive au stator est découplé. En effet, avec une inductance magnétisant constante et un réseau électrique puissant, la puissance active sera directement proportionnelle au courant statorique d'axe q, et la puissance proportionnelle au courant rotorique d'axe d à une constante près  $\frac{V_s^2}{\omega_s L_s}$  imposé par le réseau [8].

### II.13.8 Relation entre tensions rotoriques et courants rotoriques

En remplaçant dans l'équation des flux les courants statoriques par l'expression (II.72) on obtient :

$$\begin{aligned}\Phi_{rd} &= \left( L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rd} + \frac{M_{sr} V_s}{\omega_s L_s} \\ \Phi_{rq} &= \left( L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rq}\end{aligned}\quad (\text{II.73})$$

En introduisant ces expressions dans les équations des tensions rotoriques du système (II.74) on trouve [57], [58] :

$$\begin{aligned}V_{rd} &= R_r i_{rd} + \left( L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) \frac{di_{rd}}{dt} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rq} \\ V_{rq} &= R_r i_{rq} + \left( L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) \frac{di_{rq}}{dt} + g \omega_s \left( L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rd} + g \frac{M_{sr} V_s}{L_s}\end{aligned}\quad (\text{II.75})$$

En régime permanent, les termes faisant intervenir les dérivées des courants rotoriques déphasés disparaissent, nous pouvons donc écrire :

$$\begin{aligned}V_{rd} &= R_r i_{rd} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rq} \\ V_{rq} &= R_r i_{rq} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s} \right) i_{rd} + g \frac{M_{sr} V_s}{L_s}\end{aligned}\quad (\text{II.76})$$

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

En examinant les équations (II.77) et (II.78) nous pouvons élaborer le modèle pour le contrôle des puissances tel qu'il est présenté par le schéma bloc ci-dessous.

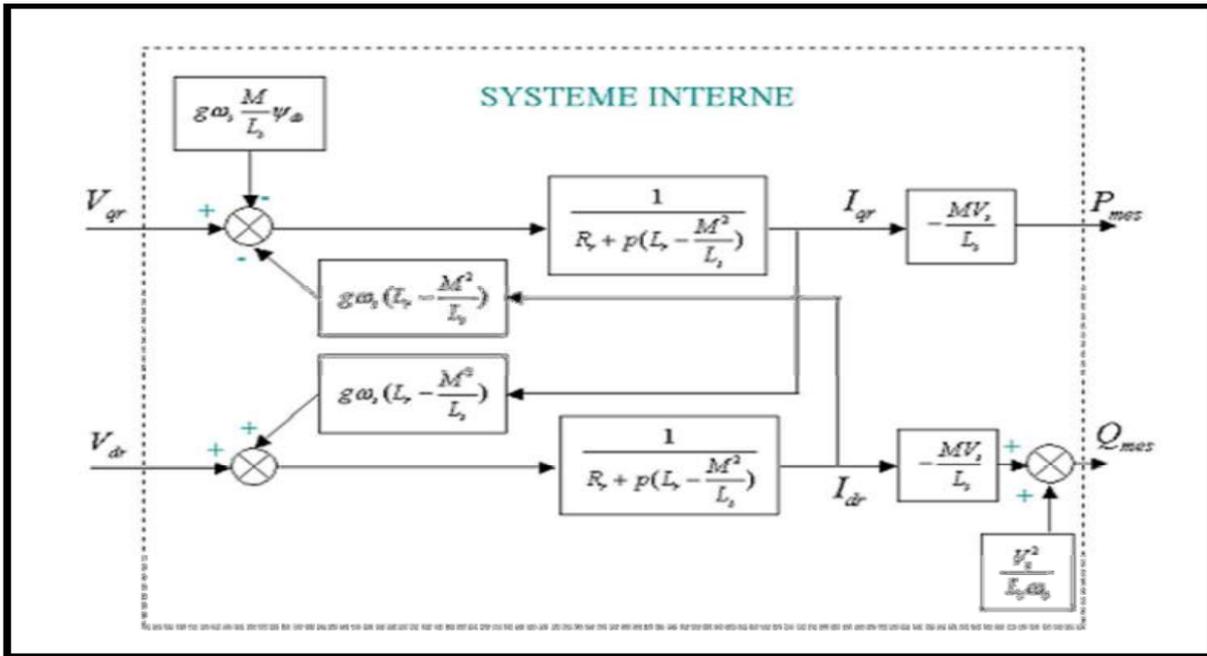


Figure 45:Modèle de la MADA pour le contrôle de puissances.

Avec :

$V_{rd}$  et  $V_{rq}$  : les composantes diphasées des tensions rotoriques à imposer à la machine pour obtenir les courants statoriques voulus.

L'expression  $(L_r - \frac{M_{sr}^2}{L_s})$  représente le terme de couplage entre l'axe directe et l'axe quadrature son influence entre les deux axes reste minimale. Une synthèse adéquate des régulateurs dans la boucle de commande permettra de les compenser .

Le terme  $g \frac{M_{sr} V_s}{L_s}$  représente une force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation. Son influence n'est pas négligeable car il entraîne une erreur de traînage.

Dans ce schéma nous avons fait apparaître des fonctions de transfert du premier ordre pour les deux axes liant les tensions rotoriques aux puissances active et réactive statoriques. Ce qui nous permet de mettre en place une commande vectorielle, étant donné qu'à l'influence des couplages près, chaque axe peut être commandé indépendamment avec chacun son propre régulateur. Les grandeurs de références pour ces régulateurs seront: la puissance active pour l'axe q rotorique et la puissance réactive pour l'axe d rotorique. La consigne de puissance réactive sera maintenue nulle pour assurer un facteur de puissance unitaire côté stator de façon à optimiser la qualité de l'énergie renvoyée sur le réseau. La consigne de puissance active devra permettre de garder le coefficient de puissance de l'éolienne optimal. Ainsi il existe deux solutions pour effectuer la commande en puissance de cette machine .

- La première méthode consiste à négliger les termes de couplage et à mettre en place un régulateur indépendant sur chaque axe pour contrôler indépendamment les puissances actives et réactive.

Cette méthode est appelée **méthode directe**, car les régulateurs de puissance contrôlent directement les tensions rotorique de la machine .

- La deuxième méthode consiste à tenir compte des termes de couplage et à les compenser en effectuant un système comportant deux boucles permettant de contrôler les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée **méthode indirecte**, découle directement des équations(II.82) et (II.85)

Dans notre travail nous utilisons la commande directe avec boucle de puissance .

### II.13.9 Commande directe

Dans cette section, nous présentons régulation indépendante des puissances actives et réactives de la machine en utilisant les remarques faites dans au paragraphe précédent. Il a été mis en évidence le lien entre, d'une part la puissance active et la tension  $V_{rq}$  et d'autre part la puissance réactive et la tension  $V_{rd}$  concevons le schéma bloc du système à régler la figure(II.31) afin de déterminer les éléments à mettre en place dans la boucle de régulation. Si l'on regarde la relation qui lie les courants rotoriques aux puissances statoriques. On voit apparaître le terme  $\frac{M_{sr}V_s}{L_s}$ . Dans notre étude, nous avons considéré que l'éolienne était raccordée à un réseau de forte puissance et stable, donc ce terme est constant.

Pour réguler la machine, nous allons mettre en place une boucle de régulation sur chaque puissance avec un régulateur indépendant tout en compensant les termes de perturbation qui sont présents dans le schéma bloc de la figure (II.31)

Nous négligerons les termes de couplage entre les deux axes de contrôle du fait de la faible valeur du glissement. Nous obtenons alors une commande vectorielle avec un seul régulateur par axe, présentée sur la figure (II.32)

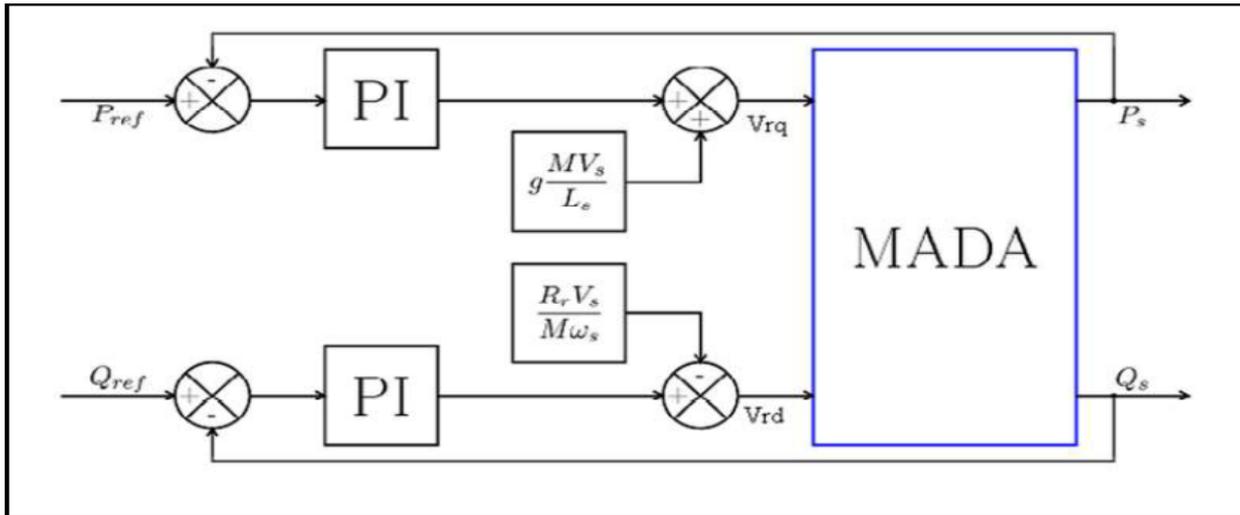


Figure II.46:Schéma bloc de la commande directe.

Le régulateur de type Proportionnel Intégral (PI) utilisé pour commander la MADA en génératrice est simple et rapide à mettre en œuvre et offrant des performances acceptable[4], C'est pour cela qu'il retenu notre attention pour une étude globale du système de génération éolien.

La figure (II.33) montre une partie de notre système bouclé et corrigé par un régulateur (PI) dont la fonction de transfert est de la forme  $K_p + \frac{K_i}{s}$  correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la figure (II.32) La détermination des paramètres  $K_p$  et  $K_i$  du régulateur fait intervenir des méthodes classiques de calcul des régulateurs continus. La synthèse de ces régulateurs est détaillée dans l'annexe C .

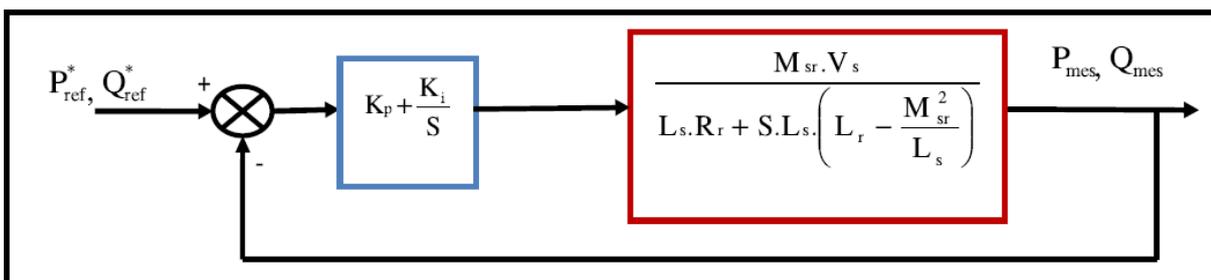


Figure II.47: Système régulé par un PI.

### II.13.10 Résultats de simulation et interprétations

La stratégie de la commande directe à base des régulateurs PI des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la machine asynchrone à double alimentation a été implémentée dans un environnement MATLAB, afin d'effectuer des tests de la régulation. Nous avons donc soumis ce système à des échelons de puissance active et réactive afin d'observer le comportement de sa régulation.

Les figures ci-dessous montrent les performances de la commande vectorielle en puissance active et réactive rotorique appliquée à une machine asynchrone doublement alimenté de puissance 1.5MW entraînée à une vitesse fixe.

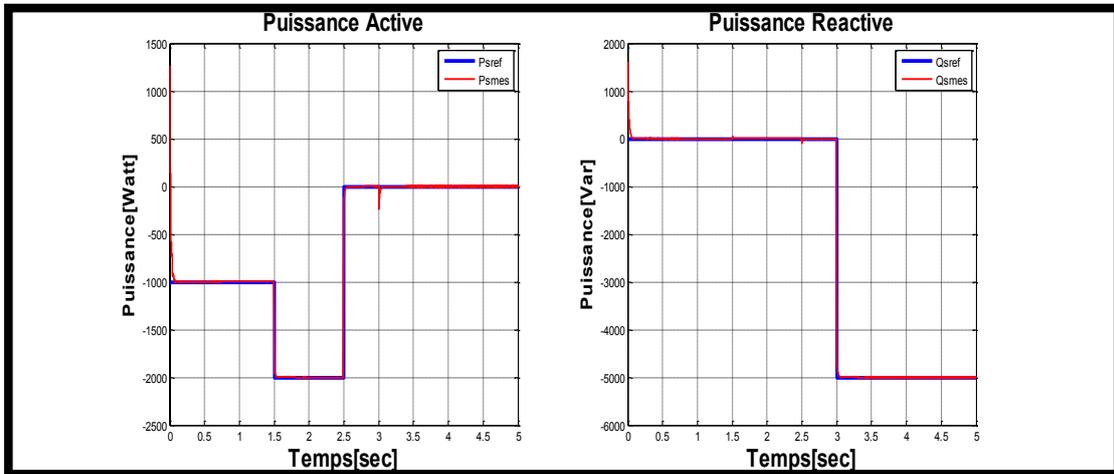


Figure II.48: La puissance active et réactivestatorique pour la commande vectorielle de la puissance

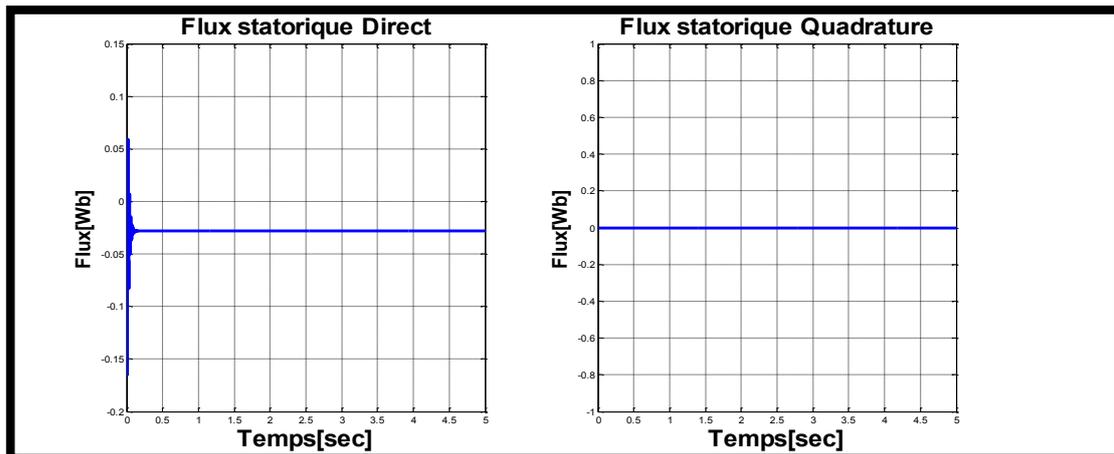


Figure II.49: Le flux statorique selon l'axe d et q pour la commande vectorielle directe de la puissance.

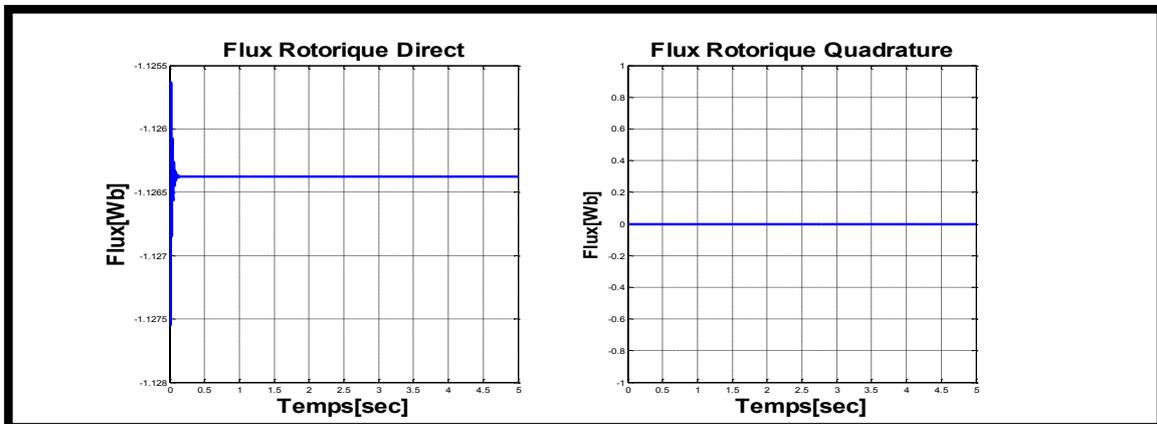


Figure II.37: Le flux rotorique selon l'axe d et q pour la commande vectorielle directe de la puissance

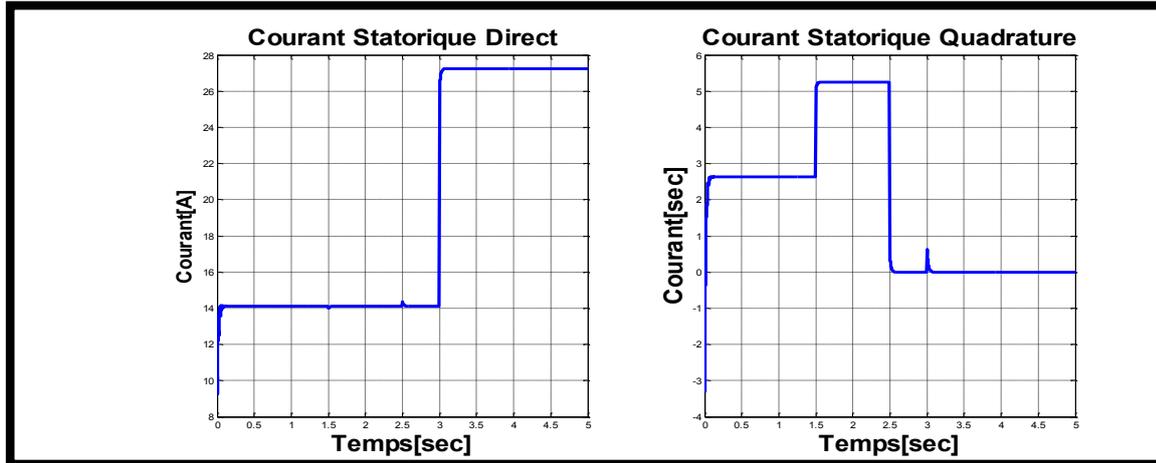


Figure II.50: courant statorique selon l'axe d et q pour la commande vectorielle directe de la puissance.

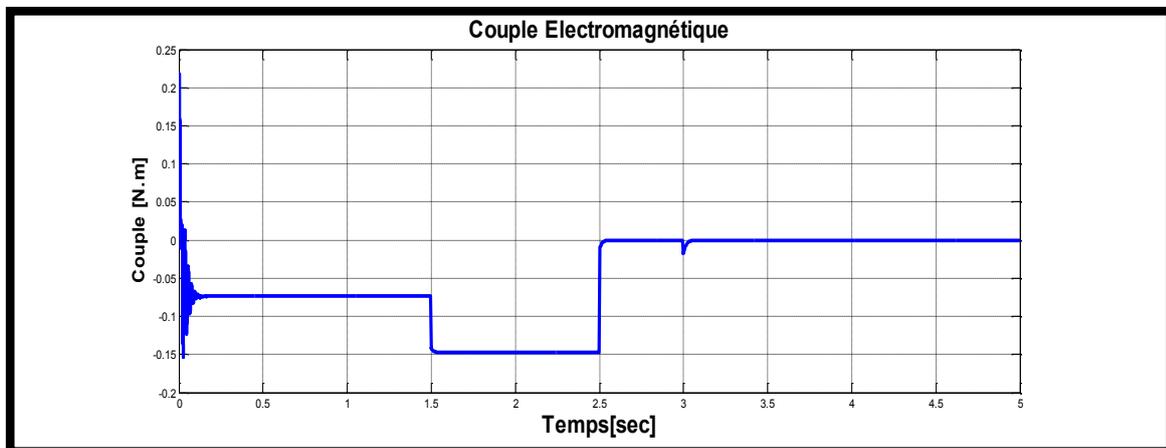


Figure II.51: Le couple électromagnétique

Figure (II.39) présente couple électromagnétique pour la commande vectorielle directe de la puissance

Les résultats de simulation présentent des différentes courbes qui sont obtenues par la commande des puissances actives et réactives générées au niveau du stator de la MADA. Cette commande permet de découpler des expressions de puissance active et réactive de générateur ou en cours celle du flux et du couple. La composante quadrature du courant rotorique  $i_{rq}$  contrôle puissance active et la composante directe  $i_{rd}$  contrôle la puissance réactive échangée entre le stator et le réseau figure (II.35)

D'après les résultats obtenus, on constate que le contrôle direct utilisant des régulateurs PI présente un bon découplage au réglage des puissances active et réactive au niveau du stator. Après un régime transitoire. Une bonne poursuite des allures à leur valeurs de référence imposées dans le cas d'un entraînement à vitesse constante.

On peut remarquer que les échelons de puissance figure (II.35) sont bien suivies par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive. Cependant on observe l'effet du couplage entre les deux axes (d et q) car un échelon imposé à l'une des deux puissances (active et réactive) induit de faibles pics sur la seconde.

La puissance active du côté statorique est négative entre les instants  $t=1.5s$  et  $t=2.5s$  ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fournie par la MADA.

La puissance réactive est nulle entre les instants  $t=0s$  et  $t=3s$ , c'est une condition de fonctionnement de la MADA pour avoir un facteur de puissance unitaire. Enfin le fonctionnement de contrôle de puissance réactive nous permet d'avoir une puissance négative (comportement capacitif) ou positive (comportement inductif).

Nous pouvons constater que le flux statorique figure (II.36) suit sa référence suivant l'axe d avec une composante quadrature presque nulle, ce qui signifie que le découplage de la machine est réalisé avec succès.

## II.14 Le convertisseur

Pour la structure de commande, il faut intégrer un onduleur de tension au niveau des bobines du rotor où les signaux de commande résultent de l'application de la commande vectorielle de la MADA afin de régler simultanément la fréquence et la tension. En vue de la modélisation la machine asynchrone à double alimentation qui est présentée dans le repère de Park, nous utiliserons dans tout ce qui va suivre un modèle continu équivalent également dans le repère de Park [59],[37],[30],[14] dans le but de simplifier l'analyse lors de l'étude du système complet de génération d'énergie.

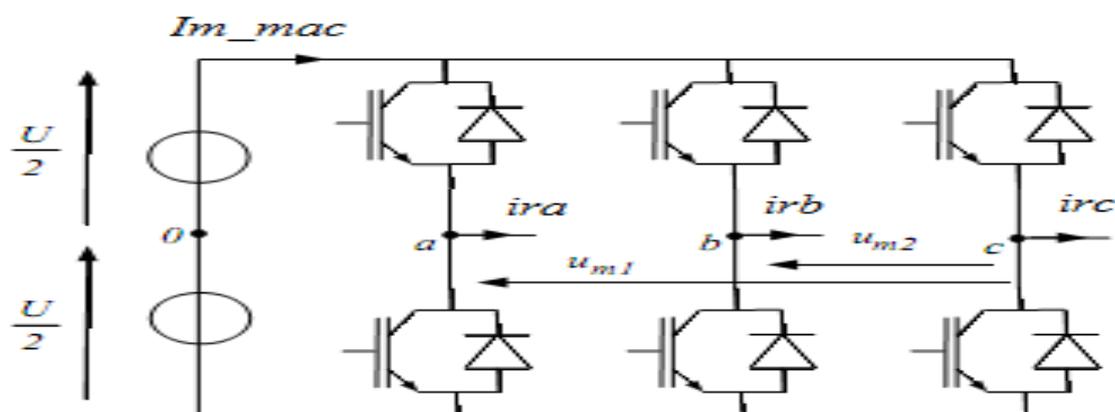


Figure II.52: Le convertisseur coté rotor de la MADA à modéliser

La commande de ce convertisseur est obtenue par une modulation de largeur d'impulsion et qui détermine les deux niveaux de tension pour chaque tension modulée  $V_{rma}$ , cette dernière résulte d'une comparaison d'un signal triangulaire  $T$  qui s'appelle la porteuse d'une fréquence très élevée avec le signal de référence  $V_{ra}$  (généralement sinusoïdal) [30], [14].

La figure (II.40) montre le principe de la MLI.

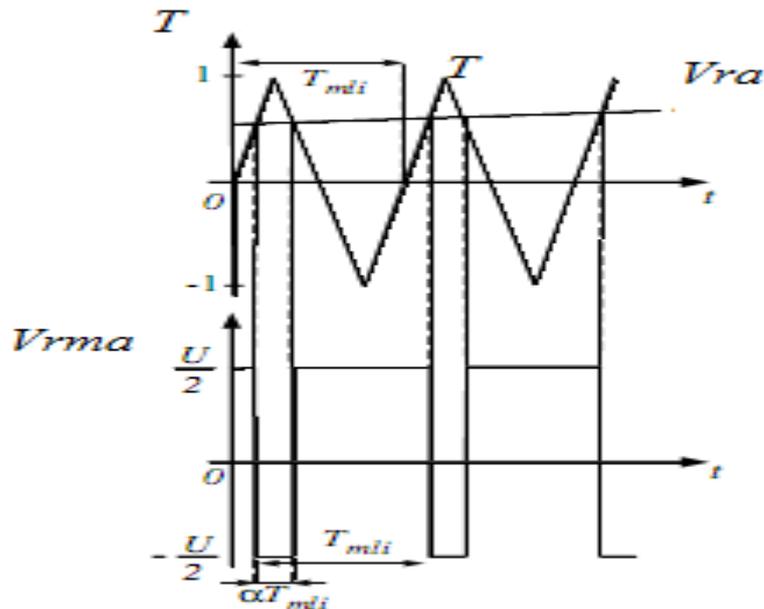


Figure II.53: Principe de la MLI

La valeur moyenne de la tension modulée sur une période MLI ( $T_{MLI}$ ) est :

$$\overline{V_{rma}} = \frac{1}{T_{mli}} \int_0^{T_{mli}} (V_a - V_0) dt = \frac{1}{T_{mli}} \left[ -\frac{U}{2} \alpha T_{mli} + \frac{U}{2} (1 - \alpha) T_{mli} \right] = \frac{U}{2} (1 - 2\alpha) \quad (\text{II.79})$$

Avec :  $\alpha$  est le rapport cyclique.

Du fait que  $T_{MLI}$  est très petite la référence  $V_{ra}$  varie peu durant cette période et les deux premières intersections de la porteuse avec la référence nous donnent [14]:

$$V_{ra} = 1 - 2\alpha \quad (\text{II.80})$$

En combinant les équations (II.87) et (II.88) on trouve :

$$\overline{V_{rma}} = \frac{U}{2} V_{ra} \quad (\text{II.81})$$

La même chose pour les deux autres phases, on aura le système suivant :

$$\begin{bmatrix} \overline{V_{rma}} \\ \overline{V_{rmb}} \\ \overline{V_{rmc}} \end{bmatrix} = \frac{U}{2} \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.89})$$

En appliquant le principe de la conservation de puissance on écrit :

$$U \cdot I_{m-mac} = \begin{bmatrix} \overline{V_{rma}} & \overline{V_{rmb}} & \overline{V_{rmc}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.82})$$

En remplaçant les tensions moyennes par leurs valeurs on obtient:

$$I_{m-mac} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} V_{ra} & V_{rb} & V_{rc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.83})$$

Où :  $\overline{V_{rma}}, \overline{V_{rmb}}$  et  $\overline{V_{rmc}}$  représentent les tensions simples modulées par le convertisseur.

$I_{m-mac}$  représente le courant modulé par le convertisseur.

En appliquant la transformation de Park sur les tensions de référence et les tensions modulées on trouve :

$$\begin{bmatrix} V_{rmd} \\ V_{rmq} \end{bmatrix} = \frac{U}{2} \begin{bmatrix} V_{rd-reg} \\ V_{rq-reg} \end{bmatrix} \quad (\text{II.84})$$

$$I_{m-mac} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} V_{rd-reg} & V_{rq-reg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.85})$$

Où:

$V_{rmd}, V_{rmq}$  représentent les tensions modulées dans le repère de Park.

$V_{rd-reg}, V_{rq-reg}$ : Les tensions de réglage dans le repère de Park.

$i_{rd}, i_{rq}$ : Les courants rotoriques dans le repère de Park.

$U$ : La tension du bus continu.

$I_{m-mac}$ : Le courant modulé par le convertisseur.

Les équations (II.93) et (II.94) qui décrivent le modèle continu équivalent du convertisseur et qui va être utilisé pour tout ce qui va suivre, on ne tient pas compte donc des fréquences de commutation des convertisseurs[14].

## II.15 Contrôle du convertisseur

Le contrôle vectoriel de machine fixe des tensions de réglage que l'on appelle  $V_{rd-reg}$  et  $V_{rq-reg}$  à appliquer au rotor de la MADA pour qu'elle suive les consignes de puissances.

D'après [37] et [32], la relation inverse du modèle continu équivalent du convertisseur pour une référence à un point milieu fictif de la tension du bus continu nous permet d'écrire[14]:

$$V_{rd-reg} = \frac{2}{U} V_{rd-ref} \quad (\text{II.86})$$

$$V_{rq-reg} = \frac{2}{U} V_{rq-ref}$$

Avec :

$V_{rd-ref}$ ,  $V_{rq-ref}$  sont les tensions de référence issues de la commande vectorielle.

Parmi les différentes structures d'alimentation de la MADA on trouve la structure dont le stator est connecté directement au réseau et le rotor est alimenté par deux convertisseurs de puissance en MLI montés en cascade via un bus continu figure( II.42).

On va étudier la liaison au réseau dont le convertisseur coté réseau est identique à celui du coté rotor (II.13), ensuite regrouper l'ensemble et finaliser le travail par des résultats de simulation pour valider le modèle complet de la chaîne[14].

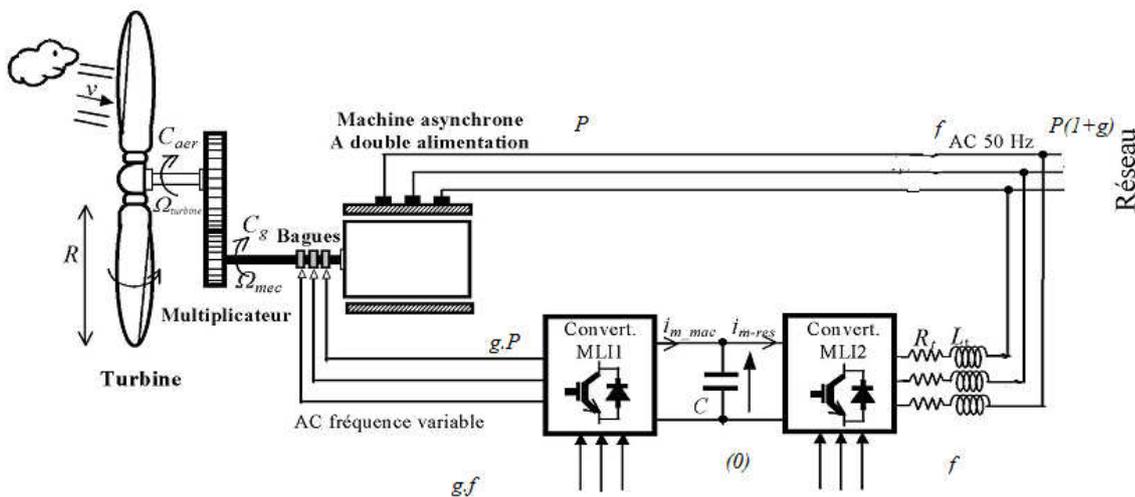


Figure II.54: Structure du système étudié.[32]

## II.16 Les avantages de la structure

La conversion de puissance considérée est formée par deux onduleurs de tension en cascade équipés avec des dispositifs semi-conducteurs IGBT et connectés au travers d'un bus continu.

Cette cascade de convertisseurs a certains avantages par rapport à d'autres systèmes tel que le Système Kramer et Scherbious [15],[14].

Elle repose sur la marge de variation de la vitesse de rotation. Celle-ci est imposée par les limites électriques et mécaniques du système.

- Le fonctionnement autour de la vitesse de synchronisme est adéquat.
- Il y a une faible distorsion des tensions et courants du rotor ainsi que des courants du stator.
- Les commandes des puissances de la machine électrique injectées par le rotor sont indépendantes.
- Il est possible de contrôler le facteur de puissance de l'installation.

La bidirectionnalité de transit de puissance rotorique permet le fonctionnement en hypo synchrone et en hyper-synchrone dont le réseau absorbe de l'énergie du stator et du rotor à la fois ce qui fait la puissance totale produite dépasse la puissance nominale. [60],[14]

Ainsi en gardant le glissement autour d'un pourcentage de  $\pm 30\%$  du synchronisme, le convertisseur est dimensionné pour un tiers de la puissance nominale [9],[8],[24].

### II.17 Modèle complet du système de conversion éolien

On adopte le modèle continu équivalent des convertisseurs représentés dans le repère de Park notamment la génératrice, le bus continu, la liaison au réseau contenant le deuxième convertisseur MLI et le filtre intermédiaire ainsi le nœud de connexion au réseau.

La figure (II.43) présente un descriptif détaillé du système visé par ce chapitre.

En regroupant la partie mécanique et la partie électrique de l'éolienne, une des algorithmes de la MPPT étudiés au chapitre deux est appliquée afin de délivrer à la génératrice la puissance active de référence tout en maintenant une référence de puissance réactive nulle pour faire fonctionner à facteur de puissance unitaire et injecter une puissance de qualité.

Les signaux de commande du convertisseur coté rotor proviennent de l'application de la commande vectorielle de la génératrice dont le convertisseur coté réseau est chargé à régler la tension de l'étape continue pour assurer toujours l'alimentation du premier et quelque soit le sens de transit de puissance.

Ce réglage de tension du bus continu fixe la puissance active de référence à échanger avec le réseau via le filtre  $R_t, L_t$  intermédiaire.

On travaille à facteur unitaire coté réseau pour cela on fixe une référence réactive égal à zéro.

C'est ces deux consignes qui vont nous servir à imposer les courants de référence transités au réseau [14].

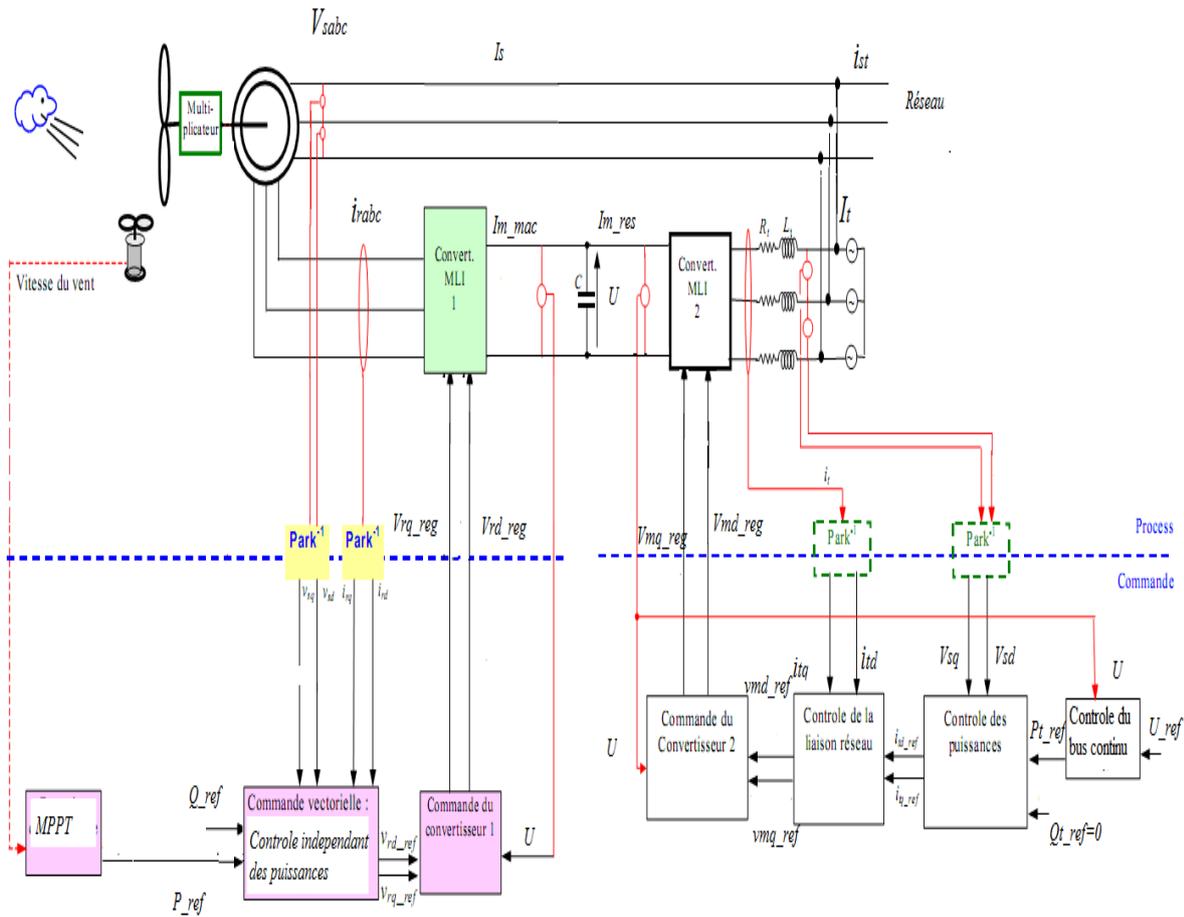


Figure II.55:Le dispositif de commande de la chaîne de conversion[61]

Plusieurs auteurs[24],[48],[61] utilisent des régulateurs PI pour contrôler les courants de filtre ( $R_t L_t$ ) ce qui nous permet de fixer par la suite les tensions de réglage qu'il faut appliquer au convertisseur (coté réseau).

### II.17.1 Le convertisseur coté réseau

Le modèle du convertisseur coté réseau ainsi sa commande est identique à celui du coté rotor de la MADA étudié au chapitre précédent, nous pouvons alors écrire[14] :

$$\begin{bmatrix} V_{rmd} \\ V_{rmq} \end{bmatrix} = \frac{U}{2} \begin{bmatrix} V_{rd-reg} \\ V_{rq-reg} \end{bmatrix} \tag{II.87}$$

$$I_{m-res} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} V_{md-reg} & V_{mq-reg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{td} \\ i_{tq} \end{bmatrix} \tag{II.88}$$

Où :

$V_{md}$ ,  $V_{mq}$ : Les tensions modulées par le convertisseur coté réseau dans le repère de Park.

$V_{md-reg}$ ,  $V_{mq-reg}$ : Les tensions de réglage du convertisseur dans le repère de Park.

$i_{td}$ ,  $i_{tq}$ : Les composantes directe et quadratique du courant circulant dans le filtre  $R_t L_t$

$I_{m-res}$ : Le courant modulé par le convertisseur coté réseau.

Les tensions de réglage sont obtenues par les relations suivantes[14] :

$$\begin{aligned} V_{md-reg} &= \frac{2}{U} V_{md-ref} \\ V_{mq-reg} &= \frac{2}{U} V_{mq-ref} \end{aligned} \quad (II.89)$$

Avec :

$V_{md-ref}$ ,  $V_{mq-ref}$  représentent les composantes directe et quadratique des tensions de références issues du contrôle de la liaison au réseau.

### II.17.2 Le bus continu[37],[49],[61],[62],[14]

En se basant sur la convention illustrée à la figure (II.44) et en intégrant le courant capacitif  $I_c$  on trouve la tension continue  $U$  par :

$$\frac{dU}{dt} = \frac{1}{C} I_e \quad (II.90)$$

$$I_e = I_{m-mac} - I_{m-res} \quad (II.99)$$

On trouve :

$$U = \int \frac{dU}{dt} + U(t_0) \quad (II.100)$$

Avec :

$U(t_0)$  représente la valeur initiale de la tension continue

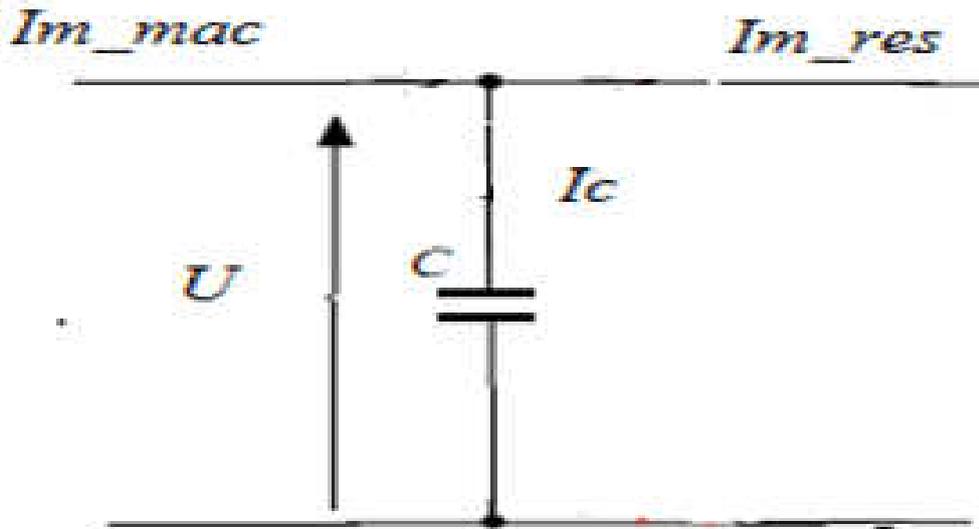


Figure II.56:Le bus continu

### II.17.3 Le filtre

Le filtre intermédiaire utilisé est de type  $(R, L)$  afin de générer au réseau des courants sinusoïdaux voire figure ( II.45)[14].

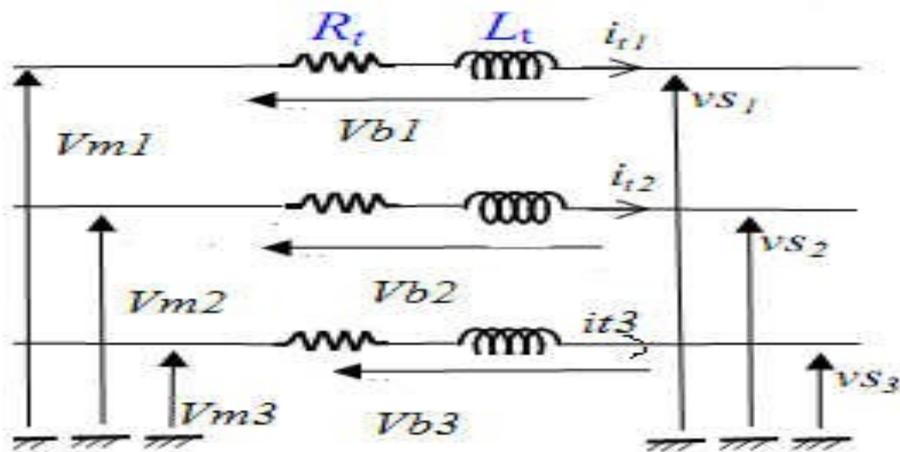


Figure II.57:Schéma du filtre.

En appliquant la loi des mailles on trouve :

(II.101)

$$\begin{bmatrix} V_{m1} \\ V_{m2} \\ V_{m3} \end{bmatrix} = R_t \begin{bmatrix} i_{t1} \\ i_{t2} \\ i_{t3} \end{bmatrix} + L_t \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} V_{s1} \\ V_{s2} \\ V_{s3} \end{bmatrix}$$

Avec :  $V_{m1}, V_{m2}, V_{m3}$ : les tensions simples modulées par le convertisseur coté réseau dans le repère triphasé.

$i_{t1}, i_{t2}, i_{t3}$ : les courants à travers le filtre.

$R_t, L_t$ : la résistance et l'inductance du filtre.

$V_{s1}, V_{s2}, V_{s3}$ : les tensions simples du réseau.

En appliquant la transformation de Park au système (II.102) on trouve le système biphasé suivant :

$$V_{md} = R_t i_{td} + L_t \frac{di_{td}}{dt} - L_t \omega_s i_{tq} + V_{sd} \quad (\text{II.91})$$

$$V_{mq} = R_t i_{tq} + L_t \frac{di_{tq}}{dt} - L_t \omega_s i_{td} + V_{sq} \quad (\text{II.92})$$

Avec :

$V_{md}, V_{mq}$ : les tensions modulées par le convertisseur dans le repère de Park

$V_{sd}, V_{sq}$ : les tensions du réseau dans le repère de Park.

$i_{td}, i_{tq}$ : les composantes directe et quadratique des courants de filtre.

Les tensions aux bornes des bobines  $V_{bd}, V_{bq}$  sont exprimées par :

$$V_{bd} = R_t i_{td} + L_t \frac{di_{td}}{dt} \quad (\text{II.93})$$

$$V_{bq} = R_t i_{tq} + L_t \frac{di_{tq}}{dt} \quad (\text{II.94})$$

Et d'autre part d'après (II.103) et (II.104) ces deux valent :

$$V_{bd} = V_{md} - V_{sd} + L_t \omega_s i_{tq} \quad (\text{II.95})$$

$$V_{bq} = V_{mq} - V_{sq} + L_t \omega_s i_{td} \quad (\text{II.96})$$

En introduisant l'opérateur de Laplace aux équations (II.104) et (II.105) nous pouvons

représenter le filtre par une fonction de transfert pour chaque axe de Park dont l'entrée est la tension aux bornes des bobines et la sortie le courant à travers le filtre et on peut écrire [3,52]:

$$G(s) = \frac{i_{td}(s)}{V_{bd}(s)} = \frac{i_{tq}(s)}{V_{bq}(s)} = \frac{1}{R_t + sL_t} \quad (\text{II.97})$$

S : représente l'opérateur de Laplace.

#### II.17.4 Le nœud de connexion

On travaille toujours dans le repère de Park et en appliquant la loi des nœuds on trouve :

$$I_{std} = I_s + i_{td} \quad (\text{II.109})$$

Avec :  $I_{std}$  et  $I_{stq}$  les composantes directe et quadratique du courant total envoyé au réseau [14].

### II.18 Contrôle de la liaison au réseau

Maintenant que nous avons modélisé chaque module de la liaison au réseau grâce à l'existence de l'étape continue (bus continu), nous pouvons conclure le modèle de commande de ce dernier en inversant les relations [14].

#### II.18.1 Réglage de la tension du bus continu

Le réglage de la tension continue se présente dans ce système par une boucle externe permettant d'imposer un courant à injecter dans le condensateur qui est noté par  $I_{c\_ref}$  et de fixer la puissance à transiter au réseau via le filtre [48], [63], [64], [14].

Pour qu'il y soit transit de puissance il faut que la tension du bus continu soit supérieure à la valeur maximale de la tension composée coté réseau [37], [24], [61].

Inversant l'équation (II.99) on peut écrire

$$I_{c\_ref} = PI_U (U_{ref} - U) \quad (\text{II.110})$$

Avec :

$PI_U$  est le régulateur de tension continu  $U$

Le régulateur utilisé pour le réglage de la tension continue est un proportionnel intégral dont le temps de réponse est supérieur à celui de la boucle interne (chargée du réglage des courants).

#### II.18.2 Contrôle des courants de filtre [24], [65], [48], [49], [14].

Le but de ce réglage est d'éliminer l'écart entre les courants transités au réseau et leurs références ; ces dernières sont obtenues en imposant des puissances de référence, pour cela on doit faire un bilan des puissances transitées.

En négligeant les pertes au niveau du condensateur, du convertisseur et du filtre ( $R_t$ ,  $L_t$ ) on peut écrire :

$$I_{c\_ref} = PI_U(U_{ref} - U) \quad (II.98)$$

La puissance réactive de référence est maintenue égale à zéro.

Et d'autre part on a :

$$P_t = V_{sd} i_{td} + V_{sq} i_{tq} \quad (II.99)$$

$$P_t = V_{sd} i_{td} + V_{sq} i_{tq} \quad (II.100)$$

Pour qu'on transite ces puissances de référence les courants de références peuvent être tirés en combinant les équations (II.113) et (II.114) comme suite :

$$I_{td-ref} = \frac{P_{t-ref} V_{sd} + Q_{t-ref} V_{sq}}{V_{sq}^2 + V_{sd}^2} \quad (II.101)$$

$$I_{tq-ref} = \frac{P_{t-ref} V_{sq} + Q_{t-ref} V_{sd}}{V_{sq}^2 + V_{sd}^2} \quad (II.102)$$

A partir des équations (II.105) et (II.106), on trouve les courants de filtre :

$$\frac{di_{td}}{dt} = \frac{1}{L_t} (V_{bd} - R_t i_{td}) \quad (II.103)$$

$$\frac{di_{tq}}{dt} = \frac{1}{L_t} (V_{bq} - R_t i_{tq}) \quad (II.104)$$

En inversant les équations (II.116) et (II.117) on trouve les tensions de référence  $V_{bd-ref}$  et  $V_{bq-ref}$  : (tensions non compensées) par :

$$V_{bd-ref} = PI_i(i_{td-ref} - i_{td}) \quad (II.105)$$

$$V_{bq-ref} = PI_i(i_{tq-ref} - i_{tq}) \quad (II.106)$$

Avec :

$PI_i$  est le régulateur de courant dont il est calculé en annexe B.

Connaissant ces deux tensions maintenant il est possible de déterminer les tensions de référence  $V_{md-ref}$  et  $V_{mq-ref}$  à partir desquelles on détermine les signaux de commande à appliquer au convertisseur.

D'après (II.106) et (II.107) on écrit :

$$V_{md-ref} = V_{bd-ref} + V_{sd} - L_t \omega_s i_{td} \tag{II.107}$$

$$V_{mq-ref} = V_{bq-ref} + V_{sq} - L_t \omega_s i_{tq} \tag{II.108}$$

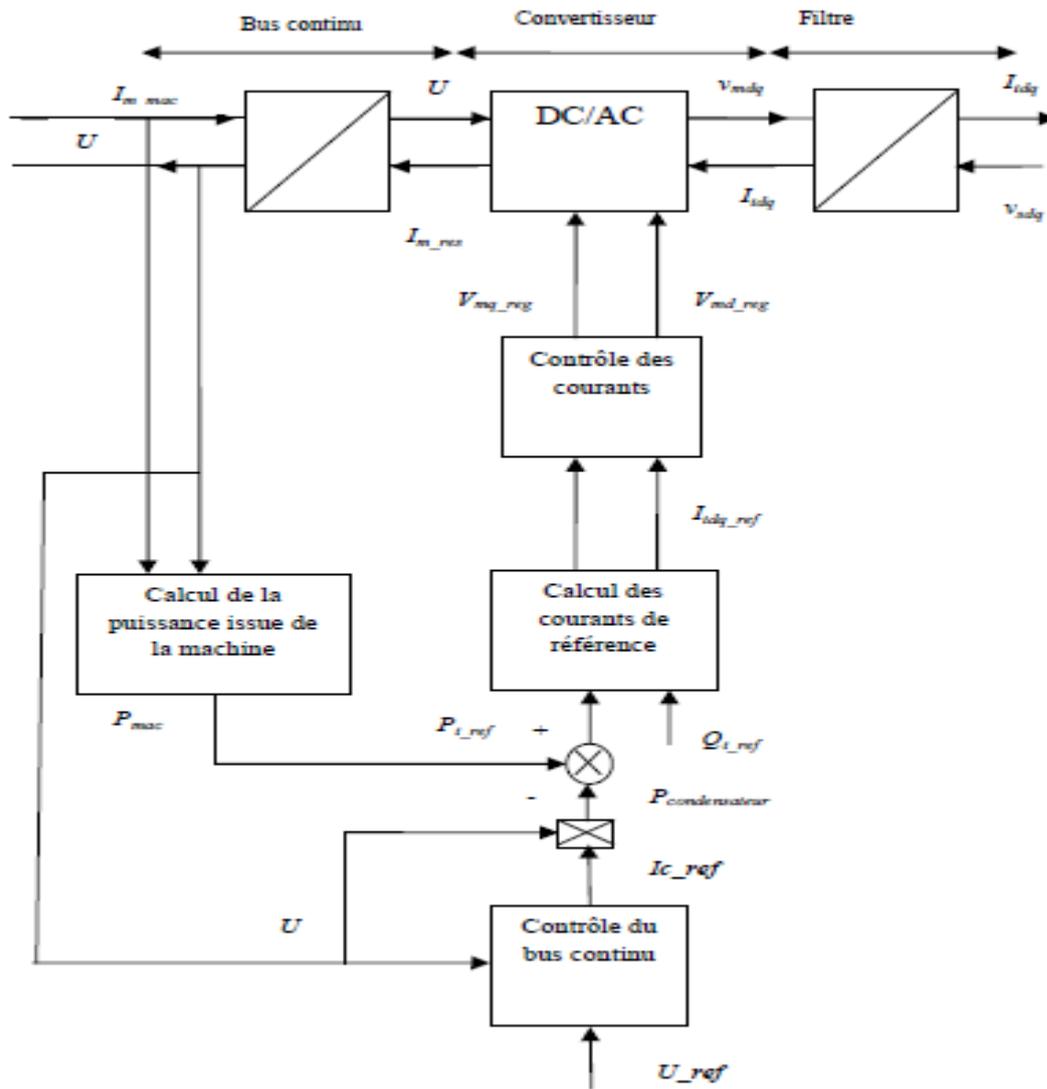


Figure II.58: Schéma de principe du contrôle de la liaison au réseau

## II.19 Simulations

Le modèle de la chaîne complète de conversion éolienne est établi dont la cascade est basée sur une machine asynchrone à double alimentation. Les résultats de simulation sont obtenus à l'aide du MATLAB Simulink.

### II.18.1 Conditions de la simulation

Le profil de vent appliqué est de 12.5m/s de vitesse moyenne et est le même appliqué lors de l'étude de la partie mécanique, ainsi la MADA utilisée est celle étudiée au chapitre précédent dont les paramètres sont cités à l'annexe.

La maximisation de la puissance est obtenue avec asservissement de la vitesse mécanique de la génératrice.

### II.18.2 Résultats obtenus

La figure (II.47) représentent respectivement : (a) le profil de vent appliqué, (b) la puissance éolienne extraite du vent

Le réglage de la tension de l'étape continue est ainsi présenté à la figure (II.48).

La puissance réactive fournie au réseau est illustrée par la figure II.49.

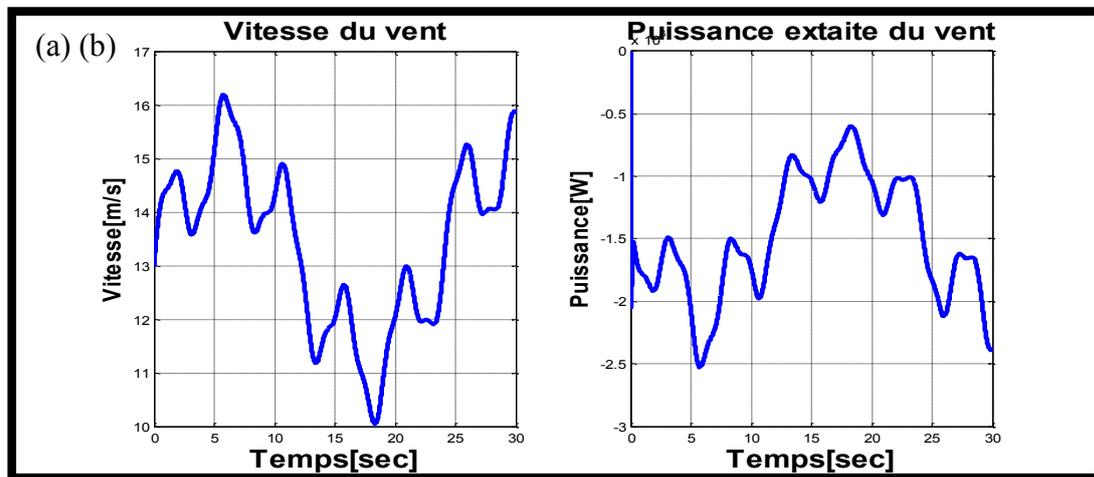


Figure II.59:(a) Le profil de vent ; (b) La puissance extraite du vent

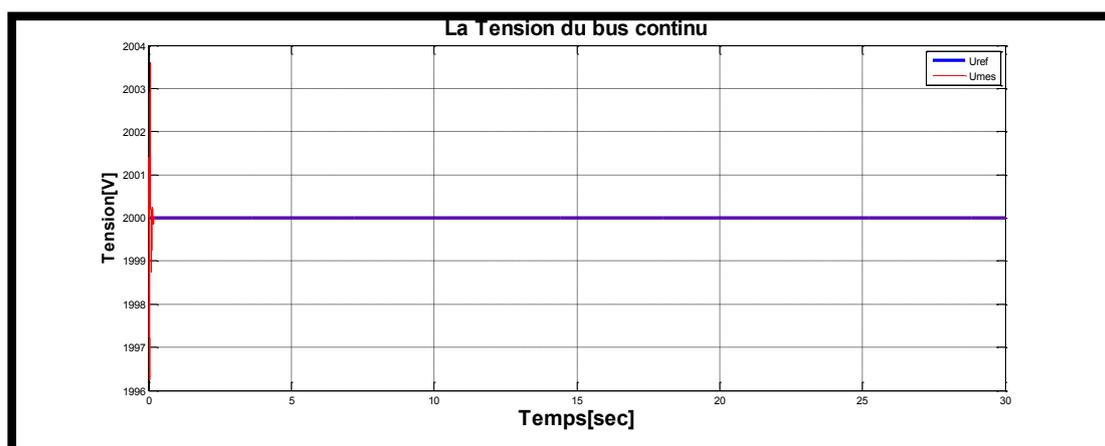


Figure II.60:La tension du bus continu

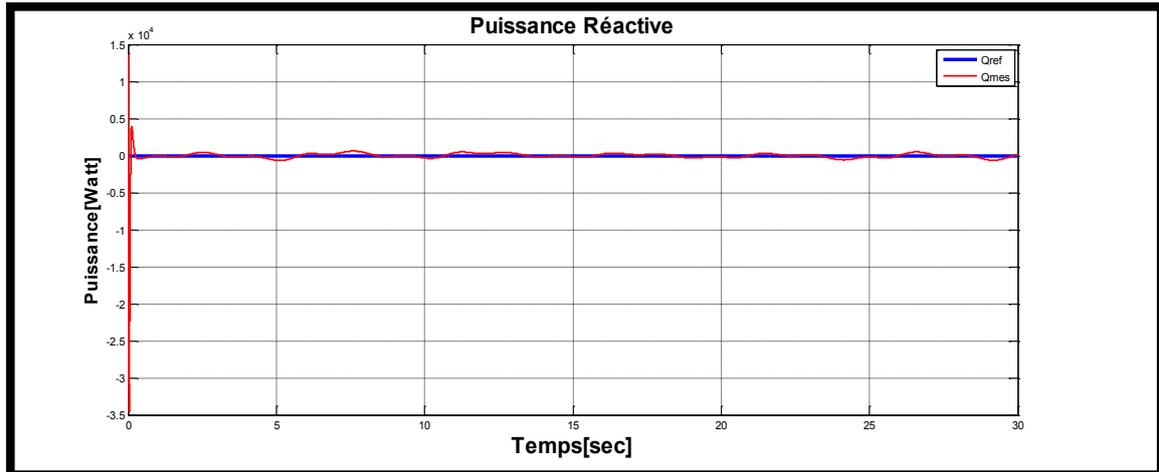


Figure 61: Puissance réactive fournie au réseau

### II.18.3 Interprétations

La tension de référence du bus continu  $V_{dc}$  est fixée à 2000V. La puissance réactive  $Q_{s\_ref}$  est fixée à 0VAR, ce qui garantit un facteur de puissance unitaire à la connexion du CCR avec le réseau électrique. Par contre, nous ferons varier la puissance réactive statorique  $Q_s$  en jouant sur sa valeur de référence dans la commande du CCM

## II.20 Conclusion :

En premier lieu de ce chapitre nous avons modélisé le vent, par la suite un modèle mathématique de la turbine a été établi par sa simulation, ce modèle a été développé dans le cadre de certaines hypothèses simplificatrices effectuées que nous devons respecter.

Après avoir présenté les différentes zones de fonction d'une éolienne, nous avons détaillé la zone particulière, où la maximisation de l'énergie extraite du vent est effectuée.

dans ce chapitre, nous avons vu brièvement une description générale de la machine asynchrone à double alimentation précisant ainsi sa constitution, sa structure, son principe et le mode de fonctionnement, domaine d'application et quelques avantages et inconvénients de la MADA.

Ensuite nous avons présenté le modèle mathématique de la machine asynchrone à double alimentation triphasé sinusoïdale pour un fonctionnement en générateur qui est obtenu par transformation de passage d'un système puis on applique la transformation de Park.

Enfin nous avons terminé la première partie de ce chapitre par une simulation de la MADA.

En ce qui concerne cette deuxième partie de ce chapitre qui nous a permis d'établir la synthèse de la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la machine asynchrone à double alimentation utilisée en fonctionnement génératrice, en utilisant un régulateur proportionnel

intégrale (PI). La commande directe effectivement nous avons pu voir que la commande directe nous a donné des résultats satisfaisants avec une facilité de mise en service.

Après nous avons détaillé tous les éléments constitutifs du système de conversion éolienne en associant la partie mécanique à la partie électrique, ainsi que la commande de chacun afin de faire fonctionner l'ensemble au maximum dans un état optimal.









### III.1. Introduction

Depuis ces dernières années, la connexion des fermes éoliennes de moyenne et grande puissance au réseau électrique a entraîné de nombreux problèmes pour la gestion du réseau électrique en raison de la nature variable de la ressource éolienne. Depuis quelques années, les éoliennes sont contrôlées par la stratégie MPPT pour transférer leur maximum de puissance générée au réseau électrique. Cependant, ces éoliennes se déconnectent de celui-ci lorsqu'un défaut y survient puisque elles n'ont aucune capacité à régler leur production et de fournir des services pour le système électrique. Afin de surmonter ces problèmes et d'assurer la sécurité du réseau électrique, de nombreux pays européens ont récemment revu leurs réglementations « réseau ». De ce fait, les fermes éoliennes sont appelées de plus en plus à se conformer aux exigences imposées par le gestionnaire du réseau. Plusieurs techniques de supervision et de commande des fermes éoliennes sont actuellement investiguées à savoir : le contrôle des puissances active et réactive le contrôle de la tension, le contrôle de la fréquence, et la tolérance vis-à-vis des défauts du réseau. Dans l'objectif de permettre à une ferme éolienne de se connecter au réseau électrique sans affecter sa sécurité et sa stabilité, les chercheurs tentent d'orienter leurs travaux vers la conception d'une supervision centralisée pour cette ferme. La stratégie ici investiguée consiste à exploiter l'effet de foisonnement au sein de la ferme pour concevoir une répartition adéquate des puissances active et réactive sur les éoliennes en garantissant un meilleur soutien au réseau électrique. Dans ce chapitre, nous allons présenter une supervision centralisée des puissances active et réactive dans une ferme éolienne qui représente un des besoins majeurs du gestionnaire de réseau à l'heure actuelle. En effet, les principales réglementations techniques imposées par le gestionnaire du réseau seront évoquées en premier. Ensuite, les stratégies de supervision et de dispatching des puissances, utilisées au sein d'une ferme éolienne, seront analysées et discutées.. Enfin, la supervision centralisée des puissances active et réactive basée sur une stratégie de distribution proportionnelle sera détaillée. Des résultats de simulation et d'expérimentation seront présentés pour montrer la validité de l'algorithme utilisé. Afin de mieux contribuer à la gestion de la puissance réactive au sein d'une éolienne, une gestion locale des puissances de chaque éolienne de la ferme a été développée permettant ainsi une répartition des puissances entre le stator de la machine et le convertisseur coté réseau en considérant plusieurs modes de fonctionnement du système éolien[66].

### III.2. Algorithme de supervision locale de la puissance réactive

#### III.2.1 Principe

Afin de mieux distribuer la production de la puissance réactive de référence au sein d'une éolienne, un algorithme de supervision locale de cette dernière a été proposé. Celui-ci permet de répartir la

puissance réactive entre le stator de la MADA et le convertisseur coté réseau d'une manière coordonnée. Trois modes de fonctionnement du système ont été considérés mode delta, MPPT et défaut[66].

### III.2.1.1 Mode 1(Delta)

Pour le mode de fonctionnement en puissance de réserve, la ferme éolienne fonctionne en dessous de sa capacité maximale de production de la puissance active ( $0 < P_{WF\_ref} < P_{WF\_max}$ ). Dans ce cas, le convertisseur coté réseau et le stator de la MADA contribuent d'une façon coordonnée pour compenser la puissance réactive totale demandée ( $Q_{WG\_ref\_i}$ ). La stratégie de distribution proportionnelle est utilisée pour calculer les puissances réactives de référence pour le convertisseur coté réseau ( $Q_{t\_ref\_i}$ ) et le stator de la MADA ( $Q_{s\_ref\_i}$ )[66]. Ces références sont fonction des capacités maximales de production du convertisseur coté réseau ( $Q_{t\_max\_i}$ ) et du stator de la MADA ( $Q_{s\_max\_i}$ ), ceci en utilisant l'algorithme de distribution proportionnelle (équation III.1).

$$Q_{t\_ref\_i} = \frac{Q_{WG\_ref\_i}}{Q_{WG\_Max\_i}} Q_{t\_max\_i} \quad (III.1)$$

$$Q_{s\_ref\_i} = \frac{Q_{WG\_ref\_i}}{Q_{WG\_Max\_i}} Q_{s\_max\_i}$$

### III.2.1.2 Mode 2(MPPT)

Ce mode correspond à un domaine de production électrique faible. L'éolienne fonctionne pour délivrer son maximum de production de puissance active au réseau électrique. Dans ce cas, le convertisseur coté réseau compense la totalité de la puissance réactive de référence demandée et le stator de la MADA est utilisée pour produire uniquement de la puissance active.

$$Q_{t\_ref\_i} = Q_{WG\_ref\_i} \quad (III.2)$$

$$Q_{s\_ref\_i} = 0$$

Si la puissance réactive de référence demandée de l'éolienne  $Q_{WG\_ref\_i}$  est supérieure à la puissance réactive que peut produire le convertisseur coté réseau, ce dernier produit le réactif avec sa capacité maximale et le stator de la MADA fournit le reste de la puissance réactive manquante[66].

$$Q_{t\_ref\_i} = Q_{t\_max\_i} \quad (III.3)$$

$$Q_{s\_ref\_i} = Q_{WG\_ref\_i} - Q_{t\_max\_i}$$

### III.2.1.3 Mode 3 (MF = 1)

Ce mode de contrôle est appliqué lorsqu'un défaut survient sur le réseau électrique (un creux de tension, un court-circuit, ...etc.). Le crow bar court-circuite le rotor de la MADA et le convertisseur

coté réseau fonctionne comme un STATCOM pour compenser la puissance réactive demandée, dans la limite de sa capacité maximale de production du réactif.

$$Q_{t\_ref\_i} = Q_{WG\_ref\_i} - Q_{s\_mes\_i} \quad (III.4)$$

$$Q_{s\_ref\_i} = Q_{s\_mes\_i}$$

### III.3. Etat de l'art sur les algorithmes de supervision des puissances active et réactive dans une ferme éolienne

Les travaux de recherche récents dans le domaine des éoliennes s'orientent vers la conception des algorithmes de supervision des fermes éoliennes dans le but de répartir les références des puissances active et réactive sur les différentes éoliennes de la ferme. Dans ce contexte, plusieurs algorithmes ont été proposés [67] et peuvent être classés principalement en trois groupes :

- 1- Les algorithmes de supervision basés sur des régulateurs Proportionnel Intégral PI,
- 2- 2- Les algorithmes de supervision basés sur des fonctions d'optimisation.
- 3- Les algorithmes de supervision basés sur une distribution proportionnelle.

#### III.3.1 Les algorithmes de supervision basés sur des régulateurs Proportionnel

##### Intégral PI

Cette classe d'algorithme règle le problème de la supervision de la ferme éolienne en utilisant un simple régulateur PI. Deux algorithmes peuvent être distingués. Le premier utilise le régulateur PI pour régler le facteur de puissance [[68], [69], [70] et [71], tandis que le deuxième régule directement les puissances active et réactive [72], [73], [66].

##### III.3.1.1 Algorithme pour le réglage du facteur de puissance de la ferme éolienne

Cet algorithme contrôle le facteur de puissance de la ferme éolienne en agissant sur la puissance réactive. En effet, le facteur de puissance de référence, issu de la demande du gestionnaire de réseau, est comparé au facteur de puissance réel de la ferme. Ensuite un régulateur de type PI est utilisé afin de générer à sa sortie le facteur de puissance de référence de chaque éolienne. Les éoliennes de cette ferme sont contrôlées avec la stratégie MPPT pour fournir leur maximum de puissance active. Par conséquent, la puissance réactive de référence demandée à chaque éolienne.

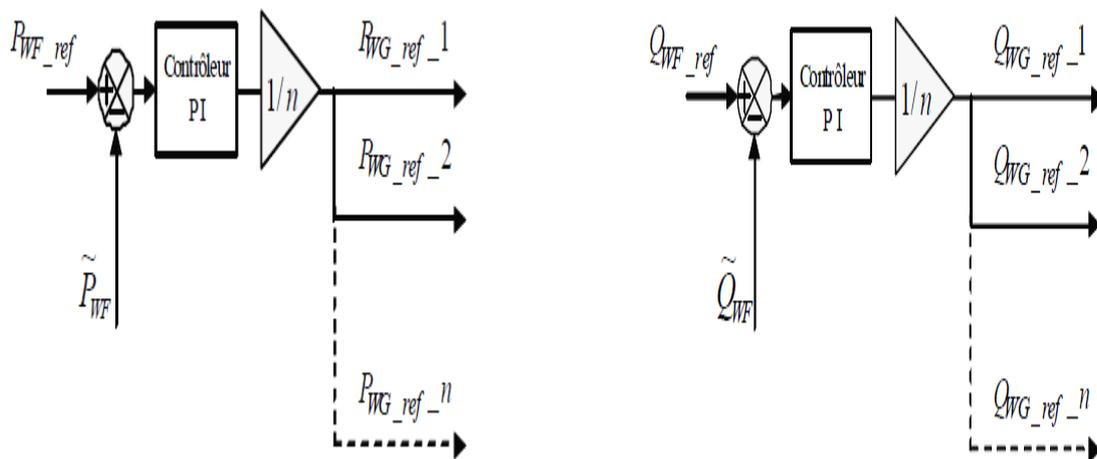
Cette supervision présente l'avantage d'un réglage simple et robuste du facteur de puissance et par conséquent de la puissance réactive. En plus, l'estimation de la puissance aérodynamique de chaque éolienne n'est pas nécessaire pour ce contrôle, ce qui facilite l'implémentation expérimentale de cet algorithme en réduisant son temps d'exécution.

Cependant, la distribution de la puissance réactive de référence sur les éoliennes de la ferme est effectuée d'une façon non proportionnelle, ce qui peut provoquer la saturation de quelques éoliennes pendant que d'autres restent capables de fournir beaucoup plus de puissance active ou réactive.

### III.3.1.2 Algorithme pour le réglage des puissances active et réactive de la ferme éolienne

Partant du même principe, l'algorithme de distribution des puissances active et réactive dans une ferme éolienne utilise un régulateur PI pour contrôler les puissances active et réactive dans une ferme éolienne composée de génératrices éoliennes à vitesse variable. Pendant l'exécution de cet algorithme, toutes les génératrices éoliennes de la ferme reçoivent les mêmes références issues d'un régulateur PI qui régule les puissances active et réactive de la ferme [73][74].

Le principe de cet algorithme de contrôle est montré sur la figure( III.1). Les puissances active et réactive réelles de la ferme sont comparées respectivement avec leurs références imposées par le gestionnaire du réseau. Ensuite, des régulateurs de type PI avec anti windup sont utilisés pour déterminer les mêmes références de puissance active et réactive pour chaque éolienne de la ferme[66].



(a) Contrôle de la puissance active.

(b) Contrôle de la puissance réactive

Figure III.62: Schéma bloc du contrôle des puissances active et réactive d'une ferme

Etant donné que la mesure de la puissance aérodynamique est basée sur la mesure de la vitesse du vent qui est fortement aléatoire et difficilement mesurable, l'avantage que procure cet algorithme est qu'il ne nécessite pas la mesure de la puissance aérodynamique disponible au niveau de chaque éolienne. Ceci, facilite énormément l'implémentation de l'algorithme en temps réel, mais le risque

de saturations des éoliennes est bien présent car l'information sur les puissances active et réactive maximales de chaque éolienne n'est pas disponible et non prise en compte [66].

### III.3.2 Algorithmes basés sur des fonctions objectives

Cette catégorie d'algorithmes utilise une fonction objective pour la répartition optimale des puissances active et réactive sur les éoliennes de la ferme. [75], [76],[67].

### III.3.3 Algorithme basé sur la distribution proportionnelle des références de puissances

L'algorithme basé sur la distribution proportionnelle a été développé dans le but de distribuer les consignes de puissance d'une façon proportionnelle sur les éoliennes de la ferme. D'un point de vue sécuritaire, cet algorithme assure à chacune des éoliennes de fonctionner toujours loin de ses limites définies par le diagramme  $(P, Q)$  [77], [78],[66].

Cet algorithme détermine les références des puissances active et réactive de chaque éolienne

L'avantage que présente cette stratégie est qu'elle assure que toutes les éoliennes de la ferme fonctionnent suffisamment loin de leurs capacités maximales de production et par conséquent, le risque de saturation des éoliennes ne se présente pas. Même si l'une d'entre elles est saturée, c'est-à-dire que l'éolienne évolue à son maximum de production ou de consommation du réactif, la puissance manquante est reportée sur les autres éoliennes encore capables de satisfaire la demande. Néanmoins, l'implémentation de cette stratégie est un peu complexe puisque elle a besoin des informations sur la puissance aérodynamique disponible de toutes les éoliennes [79]. Par ailleurs, la difficulté d'estimation de cette dernière au niveau de chaque éolienne dépend directement de la vitesse du vent (grandeur difficilement mesurable) et rend cette méthode approximative [66].

## III.4. Résultat de simulation

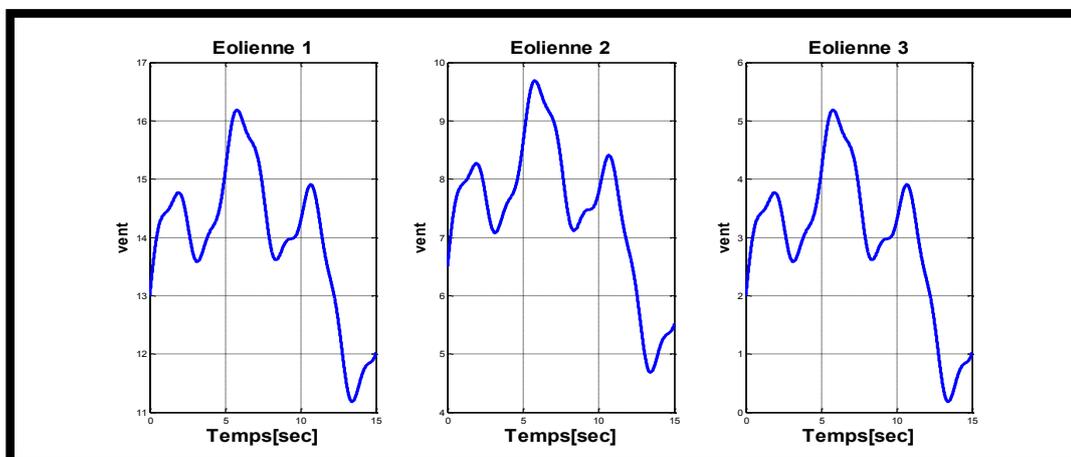


Figure III.63: les profils du vent dans une ferme éolienne

### III.4.1 Conditions de simulation

Afin de tester la robustesse de l’algorithme mise en œuvre le gestionnaire réseau exige des puissances active et réactive tel que à revoir ces valeur et comparer avec les figures .

Entre l’ instant[0 4]  $Q_{ref} = 0$  Var, [0 3]  $P_{ref} = -1.5$ Watt

A l’ instant [49.8]  $Q_{ref} = -4.10^6$  Var, [3 5]  $P_{ref}$  augmente jusqu’à 0

A l’ instant [9.8 13]  $Q_{ref} = -4.10^6$ Var.

A l’ instant [13 21]  $Q_{ref} = 1.10^6$ Var.

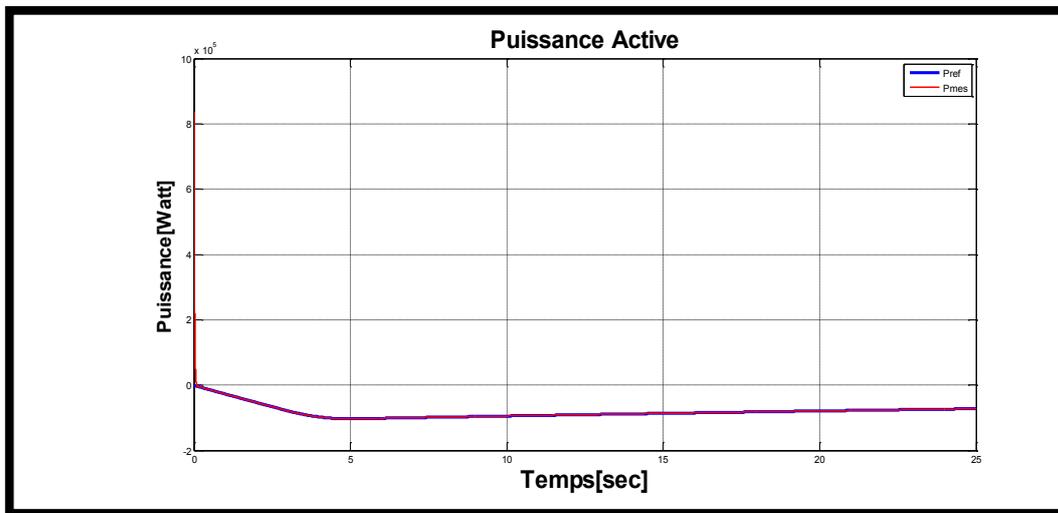


Figure III.64:la puissance Active de la ferme

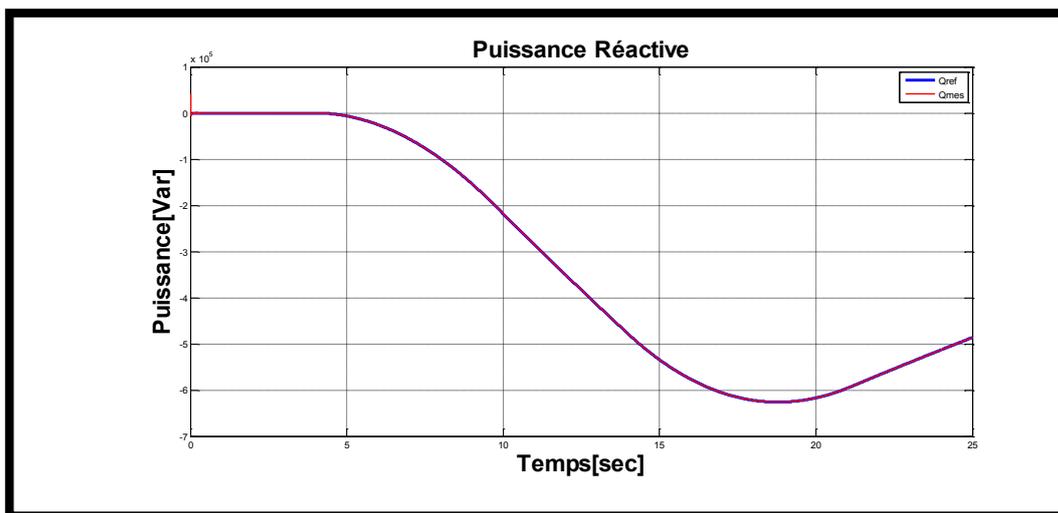


Figure III.65:la puissance réactive dans une ferme

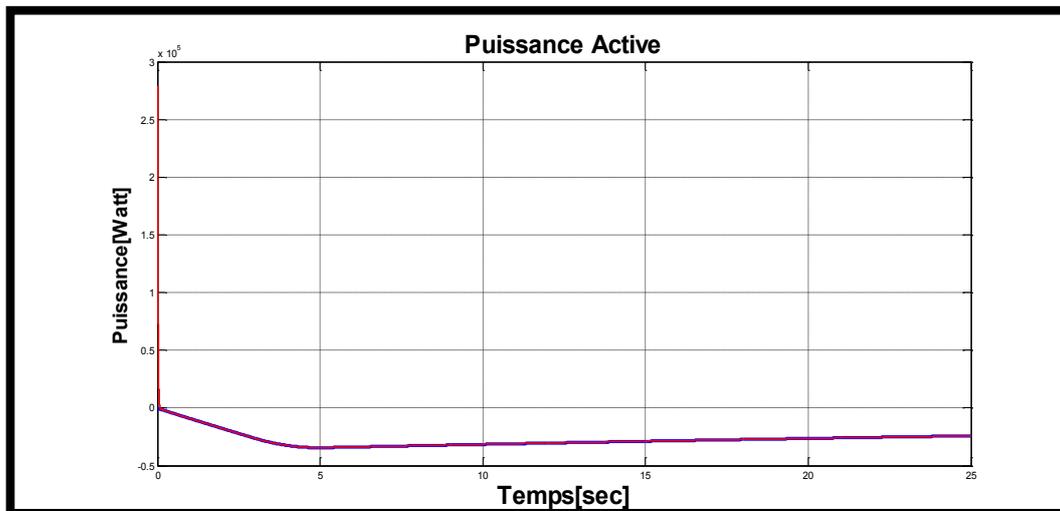


Figure III.66: la puissance Active de chaque éolienne

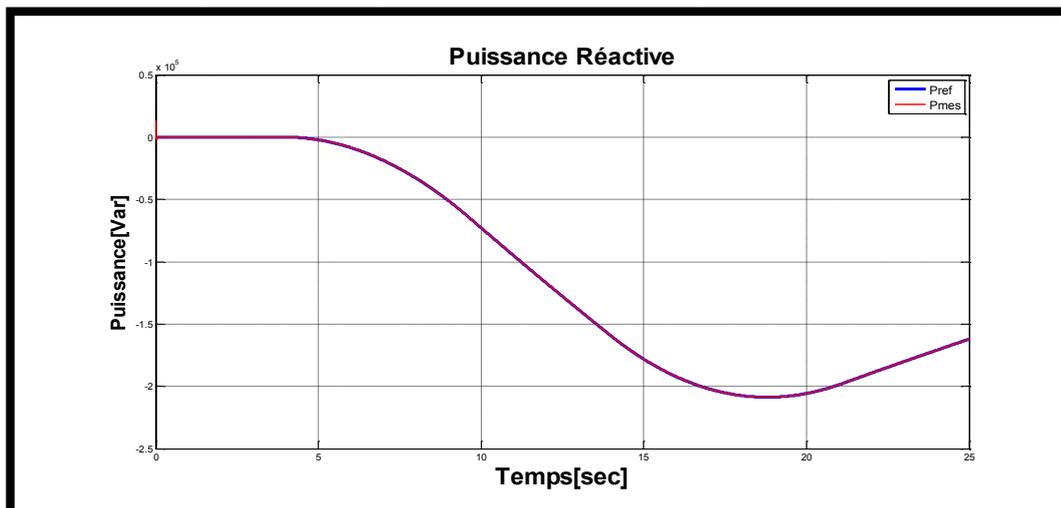


Figure III.67: La puissance Réactive de chaque éolienne

### III.4.2 Interprétation des résultats

Les figures (III.4 et III.5) représentent les réponses de puissance active et réactive, en appliquant l'algorithme de réglage de la puissance active et réactive de la ferme, la figure(III.1).

L'application de cet algorithme nous permet de contrôler les puissances active et réactive mesurées de la ferme éolienne et les asservir à leurs références imposées par le gestionnaire du réseau.

On a utilisé des régulateurs de type PI pour déterminer les mêmes références de puissance active et réactive et vu les résultats obtenus pour chaque éolienne de la ferme.

On peut dire que l'algorithme de supervision adopté présente une bonne robustesse face aux variations des puissances imposées par le gestionnaire du réseau.

### **III.5. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la supervision centralisée des puissances active et réactive dans une ferme éolienne. En premier lieu, les principales réglementations techniques pour la connexion des fermes éoliennes au réseau, qui sont imposées par le gestionnaire de ce dernier, ont été présentées. Ensuite, les différents algorithmes de supervision des fermes, existant dans la littérature, ont été exposés. Les algorithmes basés sur l'emploi d'un régulateur PI présentent une simplicité particulière d'implémentation mais le risque de saturation des éoliennes est toujours présent.

