



I.1 Historique

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. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2 000 ans avant J.-C. environ. Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Âge. Utilisés tout d'abord pour mouliner le grain, d'où leur nom de « moulins », ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le XIV^e siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie.[1] [2] Seulement en Hollande et Danemark, vers le milieu du XIX^e siècle, le nombre des moulins est estimé respectivement à plus de 30 000 et dans toute l'Europe à 200 000. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive. [2] [5] [6] 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 » et de nouveau utilisée (dans les années 40 au Danemark 1300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées) aux États-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 [5]. C'est avec la crise pétrolière des années 70 que cet intérêt ressurgit. Ainsi plusieurs pays commencèrent à investir de l'argent pour notamment améliorer la technologie des aérogénérateurs, ce qui donna naissance aux aérogénérateurs modernes.

En 2006, l'Algérie a décidé de se doter de la technologie éolienne en implantant la première ferme éolienne à Tindouf. Elle aura une puissance de 50 MW et, d'ici 2015, 5% des besoins algériens en électricité seront assurés par les énergies renouvelables dont l'énergie éolienne [4].

I.2 Présentation du système éolien

I.2.1 Introduction

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. L'énergie récupérée est fonction de la vitesse du vent et de la surface mise face au vent. L'utilisation de cette énergie est soit directe (mouture, pompage) soit indirecte (production d'électricité via un générateur).[3]



I.2.2 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" i.e (non dégradée), géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [7].[4]

I.2.3 Développement de l'énergie éolienne

Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an Ceci est principalement dû à deux raisons :

- Produire une énergie propre .
- Trouver une source d'énergie durable alternative aux combustibles fossiles [8].

En Europe, principalement sous l'impulsion Allemande, Scandinave et Espagnole, on comptait en 2000 environ 15 GW de puissance installée. Ce chiffre a presque doublé en 2003,(le taux de croissance le plus important de l'industrie de la production d'électricité. Avec une croissance de 30%)., soit environ 27 GW pour 40 GW de puissance éolienne installée dans le monde. En prévision, pour l'année 2010, on peut espérer une puissance éolienne installée en Europe de l'ordre 70 GW.

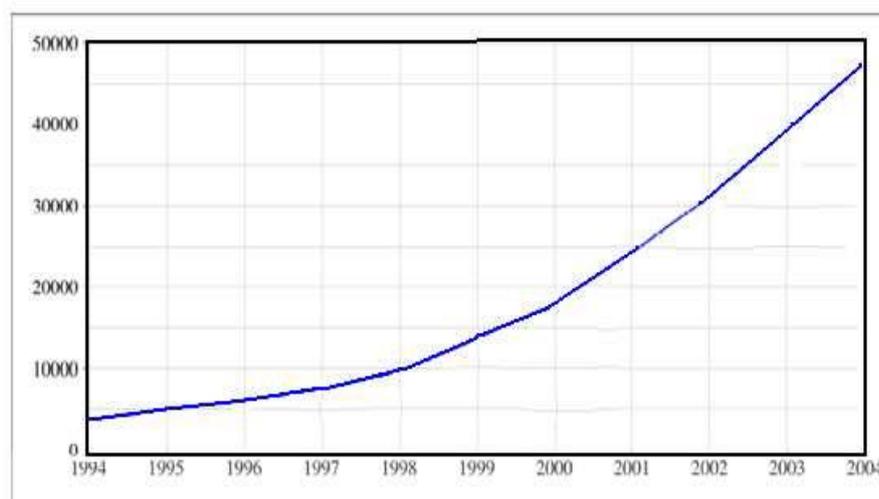


Figure I. 1 Evolution des puissances éoliennes installées dans le monde en MW

I.2.4 Emplacement des parcs éoliens

Les parcs éoliens se situent naturellement là où il y a un niveau de vent suffisant tout au long de l'année pour permettre une production maximale. Les côtes, les bords de mers et les plateaux offrent



des conditions intéressantes en terme de vent mais il faut aussi tenir compte de l'impact sur le paysage. Pour ces raisons, lorsque c'est possible, des parcs éoliens offshore sont construits [8].

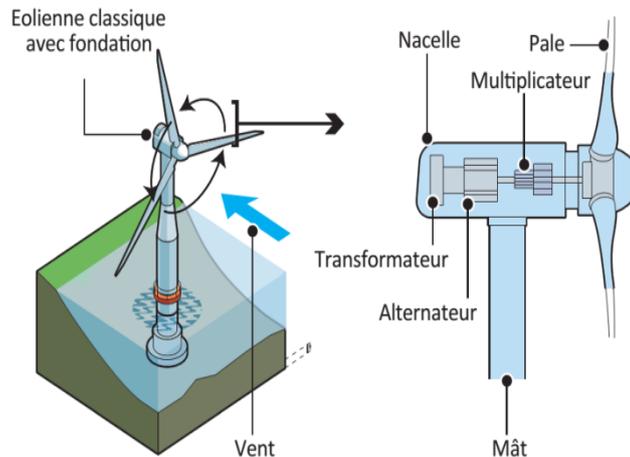


Figure I. 2 Constitution d'une éolienne

I.2.5 Les différents composants d'une éolienne

En général une éolienne est constituée de trois éléments principaux : la tour ou mât qui est l'élément porteur, une nacelle et l'ensemble rotor – pales (Fig.I.2).

➤ Le mat

C'est un élément porteur, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, il doit être le haut possible pour éviter les perturbations près du sol. La tour a une forme d'un tronc en cône où à l'intérieur sont disposés les câbles de transport d'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'accès à la nacelle. A titre d'exemple le mat d'une éolienne de 500kW à une hauteur de 40 à 60m, il peut être plein ou tubulaire. Ce dernier est plus coûteux mais il a l'avantage de permettre un accès aisé à la nacelle pour la maintenance.

➤ Les pales

Les pales permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Elles sont des pièces techniquement difficile à réaliser car elles doivent obéir à certaines règles géométriques concernant le profil aérodynamique, mais elles doivent aussi être fabriquées avec un matériau suffisamment résistant à une force de pression exercée par le vent et aux agressions extérieures telles que la pollution ou certaines particules qui se trouvent dans l'air. Les pales sont réalisées en fibre de verre ou en matériaux composites comme la fibre de carbone qui est légère et résistante.



➤ **La fondation**

Une fondation solide assurant la résistance de l'ensemble par grand vent et/ou dans des conditions de givrage.

➤ **La nacelle**

Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres, multiplicateur, roulement, le frein à disque qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne (Fig.I.3).

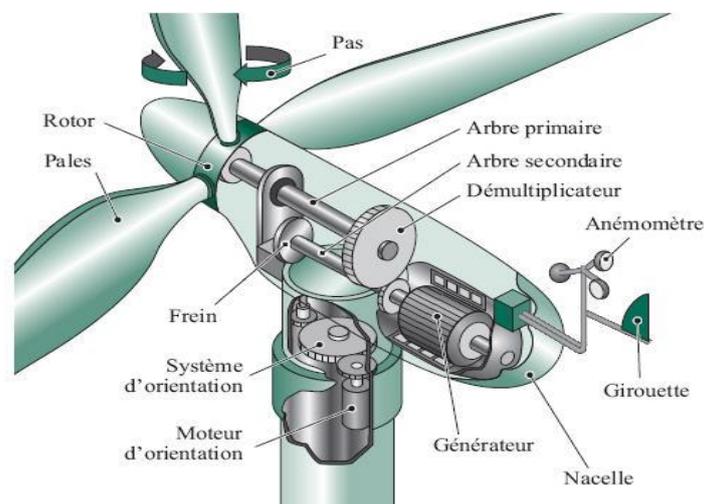


Figure I. 3 La nacelle.

➤ **Le multiplicateur**

Adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique (qui est généralement entraîné aux environs de 1500tr/min). Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

➤ **La génératrice**

La fonction première de la génératrice est de transformer l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique. Cette fonction peut être réalisée au moyen de deux types de machines: une génératrice asynchrone ou alors une génératrice synchrone. De plus un convertisseur de puissance associé éventuellement à la génératrice selon le type (direct ou indirect) déconnexion au réseau.



➤ **L'arbre lent**

Il relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

➤ **L'anémomètre**

Les signaux électriques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système de control-commande de l'éolienne pour la démarrer lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5m/s. De même le système de commande électrique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent est supérieure à 25m/s pour assurer la protection de l'éolienne.

➤ **Le système de control-commande**

Il comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation à titre d'exemple en cas de surchauffe du multiplicateur ou de génératrice, le système arrête automatiquement l'éolienne et le signale à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique.

➤ **Le rotor**

Le rotor de l'aérogénérateur est constitué de pales qui sont elles-mêmes montées sur un moyeu. Le rôle essentiel du rotor est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le rendement maximal du rotor est d'environ 59% (limite de Betz).

➤ **Le moyeu**

C'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent.

I.2.6 Les différents types d'éoliennes

➤ **EOLIENNES A 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 et il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut facilement être installée sur le toit d'une maison moderne.[3] Elles présentent l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol donc pas besoin de munir la machine d'une tour, facilitant ainsi les interventions de maintenance[1] faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts [9]. Il existe des systèmes grâce auxquels les ailes se décalent plus ou moins pour augmenter l'étendue des vitesses d'action. Si la vitesse du vent est basse, les ailes sont



complètement déployées, si la vitesse est trop forte, les ailes sont complètement fermées et l'éolienne forme un cylindre. Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées.

➤ **EOLIENNES A AXE HORIZONTAL**

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent.

Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères. Les concepts abordés dans la suite de cette étude se limiteront uniquement au cas des éoliennes à axe horizontal [9].

➤ **Eoliennes lentes**

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite.

➤ **Eoliennes rapides**

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé.



Figure I. 4 éolienne à axe vertical & éolienne à axe horizontal



I.2.7 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

➤ LES AVANTAGES

- ✚ L'énergie éolienne, propre, fiable, économique, et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement
- ✚ La production d'énergie éolienne ne produit pas d'émission de CO₂ ;
- ✚ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuit, et inépuisable.
- ✚ Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique.
- ✚ L'énergie éolienne ne présente pas de risque comme l'énergie nucléaire; et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.
- ✚ Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance.
- ✚ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- ✚ L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple.

➤ LES INCONVENIENTS

- ✚ L'impact visuel (néanmoins un thème subjectif) ;
- ✚ Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques ;
- ✚ La puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne ;
- ✚ Le bruit mécanique et L'impact sur les oiseaux.

Selon l'article de [5], il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses.

I.2.8 Principe de fonctionnement

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique. La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en génie électrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie.

Afin de valider notre étude théorique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, la réalisation pratique sinon la simulation du processus est nécessaire. Pour ce faire, on a besoin de modéliser la chaîne à étudiée. On s'intéresse dans ce chapitre à la modélisation de la chaîne de conversion globale.



I.2.9 ENERGIE CINETIQUE DU VENT – CONVERSION EN

➤ ENERGIE MECANIQUE

A la hauteur de la nacelle souffle un vent à la vitesse V_{vent} . Tant que cette vitesse est en dessous de la vitesse de seuil, les pales sont en drapeau (la surface de ces derniers est perpendiculaire à la direction du vent) et le système est à l'arrêt.

A la vitesse seuil détectée par l'anémomètre, un signal est donné par le système de commande pour la mise en fonctionnement, le mécanisme d'orientation fait tourner la nacelle face au vent, les pales sont ensuite placées avec l'angle de calage éolienne et commence à tourner. Une puissance P_{vent} est alors captée est transmise à l'arbre avec un coefficient de performance. Au rendement du multiplicateur pré, cette même puissance est retransmise à l'arbre de la génératrice à une vitesse plus élevée. Cette puissance mécanique va enfin être transformée en puissance électrique débitée par la machine.

On distingue alors deux cas, soit l'éolienne est reliée au réseau de distribution (directement ou à travers des convertisseurs statiques), soit elle alimente en autonome une charge isolée à travers ou sans les convertisseurs statiques [10].

➤ LOI DE BETZ

La puissance cinétique du vent traverse un disque éolien de rayon R (en m), D'après la théorie de Betz est donnée par la relation suivante :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_{vent}^3 \quad (I.1)$$

- R : correspond pratiquement à la longueur de la pale ;
- ρ : Masse volumique de l'air (celle-ci est de 1,25kg/m en atmosphère normale) ;
- V_{vent} : La vitesse du vent.

Cette puissance ne peut être totalement captée, cela veut dire que la vitesse du vent est nulle en derrière les pales, on exprime alors la puissance captée par une éolienne :

$$P_{cap} = C_p (\lambda) P_{vent} \quad (I.2)$$

C_p : Le coefficient de performance ou coefficient de puissance, il représente le rapport de la puissance récupérée sur la puissance récupérable. Ce coefficient qui ne peut dépasser la valeur limite, appelée limite de Betz qui est 16/27 soit 0,5926, c'est cette valeur qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée [10]. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de



Chapitre I : Généralités sur les éoliennes et la MADA et les différentes structures d'alimentation de la MADA

l'éolienne et la vitesse du vent [8]. Sa relation s'exprime comme suit :

$$C_p = \frac{P_t}{\frac{1}{2} \rho S_t V^3} \quad (I.3)$$

- P_t : Puissance de la turbine éolienne;
- $S_t = \pi R^2$: Surface balayée par la turbine éolienne.

Le C_p est en fonction du rapport λ entre la vitesse linéaire des extrémités des pales et la vitesse du vent, il est donné par :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V_{vent}} \quad (I.4)$$

Où Ω_t , en (rad/s) est la vitesse du rotor à faible vitesse, sachant que la vitesse Ω_r du rotor de la génératrice est liée à celle du rotor lent par :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_r}{K_g} \quad (I.5)$$

Où K_g représente le rapport de la vitesse du multiplicateur. On peut donc exprimer le rapport λ en fonction de la vitesse de la machine par :

$$\lambda = \frac{\Omega_r R}{K_g V_{vent}} \quad (I.6)$$

Ce rapport λ s'appelle rapport de vitesse en bout de pales (tip-speed ratio) ou rapport d'avance. La puissance mécanique transmise au rotor égale à la puissance captée, et s'écrit :

$$P_{tr} = P_{cap} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_{vent}^3 \quad (I.7)$$

L'allure de la variation du C_p en fonction du rapport de vitesse est illustrée sur la figure (I.5)

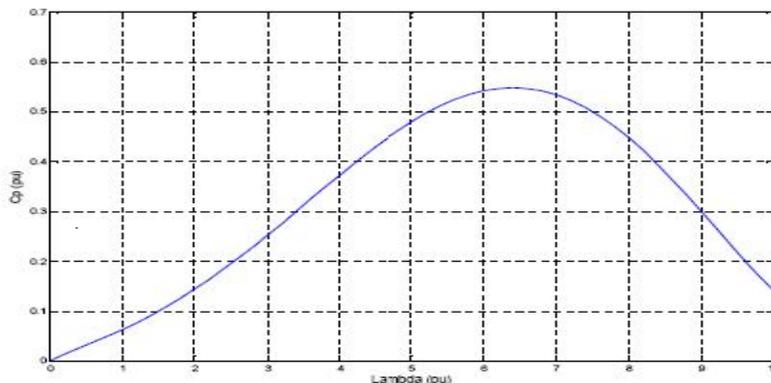


Figure I. 5 Variation du C_p en fonction du rapport de vitesse



Chapitre I : Généralités sur les éoliennes et la MADA et les différentes structures d'alimentation de la MADA

A partir de cette caractérisation $C_p(\lambda)$, il est possible de déterminer une famille de courbe qui décrit la puissance mécanique disponible sur le rotor de la génératrice en fonction de la vitesse de rotation des pales pour différentes vitesses du vent [11]. Sur la figure (I.6) on peut remarquer que pour chaque vitesse de vent, il existe une vitesse de la génératrice qui permet de capter une puissance maximale.

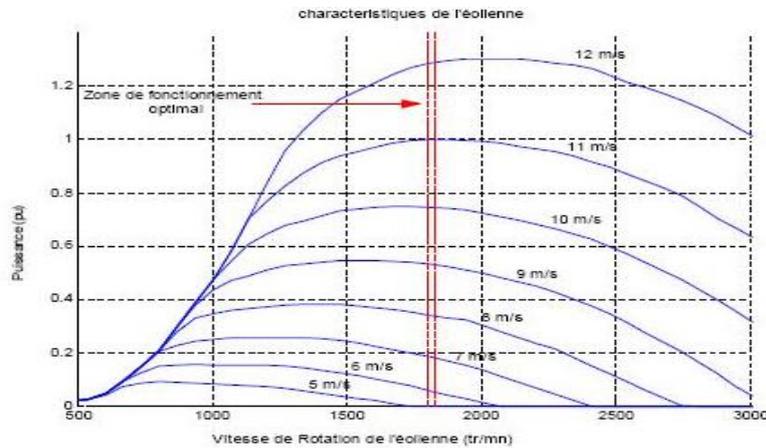


Figure I. 6 Puissance théorique disponible d'une éolienne donnée

➤ Le coefficient du couple

Le coefficient de couple C_m , est assez proche du coefficient de puissance. Il est très utile afin d'estimer la valeur des couples aux différents points de fonctionnement.

Sa valeur est déterminée par la relation suivante :

$$C_m = \frac{T_t}{\frac{1}{2} \rho S_t R_t V_{vent}^2} \quad (I.8)$$

- _ R_t : Rayon de la turbine éolienne
- _ T_t : Couple de la turbine .

➤ Production optimale d'énergie

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maxima du réseau de courbes de la figure (I.7). La puissance maximale qui peut être produite (captée) par une éolienne est sa puissance nominale, ce qui correspond à une valeur de λ donnée appelée Ω_{opt} . La vitesse de rotation optimale Ω_{opt} résultante est alors donnée par :

$$\Omega_{opt} = \lambda_{opt} \cdot \frac{V_{vent}}{R} \quad (I.9)$$



La caractéristique correspondant à cette relation est donnée sur la zone II de la figure (I.7) [1]. La vitesse du vent pour laquelle la puissance nominale de l'éolienne est atteinte est appelée vitesse nominale du vent V_n . Au-dessus de celle-ci, il y a une vitesse du vent maximale, appelée vitesse maximale de fonctionnement V_{max} à laquelle l'éolienne est conçue pour s'arrêter afin de protéger ses parties mécaniques des effets néfastes des grandes vitesses du vent. (Zone III). La vitesse du vent la plus basse à laquelle une éolienne fonctionne est connue comme la vitesse de seuil V_{min} . Au-dessous de V_{min} c'est la zone I qui correspond aux vitesses de vent très faibles, insuffisantes pour entraîner la rotation de l'éolienne.

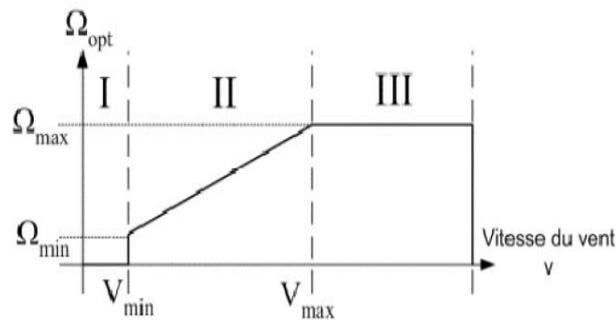


Figure I. 7 Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable.

- Pour $V_{vent} < 4\text{m/s}$, la turbine ne fonctionne pas ;
- Pour $4\text{m/s} < V_{vent} < 14\text{m/s}$, la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent ;
- Pour $14\text{m/s} < V_{vent} < 25\text{m/s}$, la puissance fournie est limitée à la puissance nominale
- Pour $V_{vent} > 25\text{m/s}$ environ (90 km/h), arrêt de l'éolienne (R=60m) [10].

➤ **Intérêt de la vitesse variable**

On donne sur la figure (I.8) la caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.

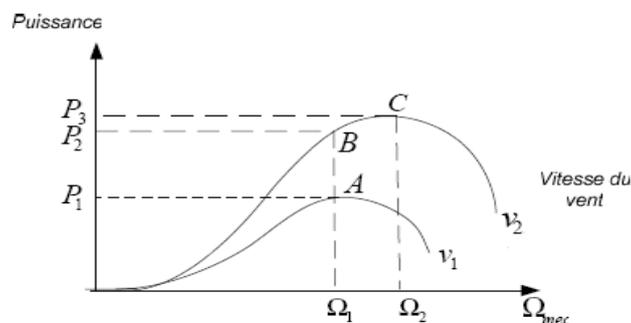


Figure I. 8 Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.



Pour une vitesse du vent V_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 , on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de V_1 à V_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2ème caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 , il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence Ω_{ref} , calculée pour maximiser la puissance extraite[1]

➤ **Le mode de régulation**

On parle souvent de deux types de régulation :

- ✚ par variation d'angle de calage « Pitch régulation » ;
- ✚ par décrochage aérodynamique « Stall-régulation ».

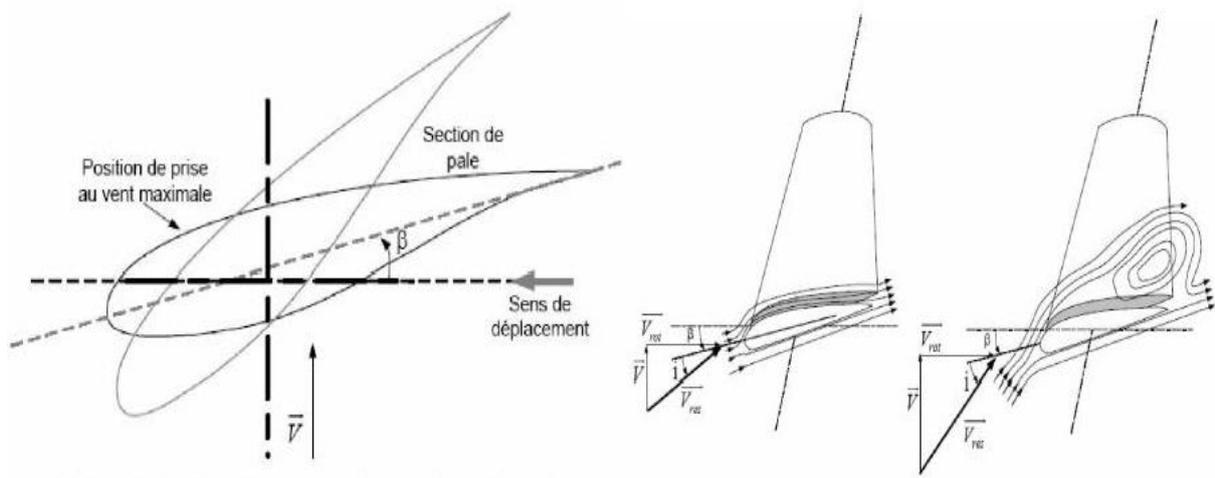


Figure I. 9 les deux types de régulation

Le premier est réalisé en orientant les pales, faisant ainsi varier la surface apparente au ven donc faisant varier l'effort, exercé par ce dernier, sur les pales. Ce système permet aussi de freiner la turbine s'il est nécessaire. (positionnement exact des pales. En général, le systèmes de régulation pivote les pales de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent pour que les pales soient toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent, de façon à assurer le meilleur rendement possible à tout moment (figure I.9) [12].)

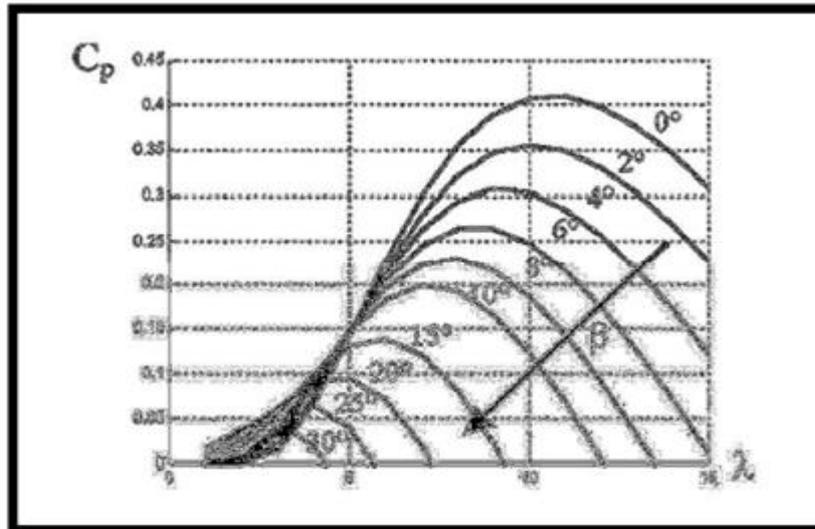


Figure I. 10 influence de l'angle de calage sur le coefficient de puissance

Le second utilise le phénomène de décrochage aérodynamique : plus la vitesse du vent est élevée, plus l'effort exercé par le vent sur les pales diminue, les éoliennes utilisant ce type de régulation possède en général un mécanisme de freinage en bout des pales qui, en cas de survitesse, actionne des masselottes par effet centrifuge pour orienter une partie de l'extrémité de la pale, freinant ainsi le rotor de manière aérodynamique [10],[13].

I.2.10 TYPE DE MACHINE ELECTRIQUE

Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration. Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants [14][3] :

➤ **Fonctionnement à vitesse fixe :**

- ✚ Système électrique plus simple.
- ✚ Plus grande habilité.
- ✚ Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- ✚ Pas besoin de système électronique de commande.
- ✚ Moins cher.

➤ **Fonctionnement à vitesse variable :**

- ✚ Augmentation du rendement énergétique.
- ✚ Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
- ✚ Réduction des efforts subis par le train de puissance.
- ✚ Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.



Chapitre I : Généralités sur les éoliennes et la MADA et les différentes structures d'alimentation de la MADA

Les deux types de machine électrique les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes [14]. On s'intéresse dans ce chapitre par la machine asynchrone à double alimentation

I.3 La machine asynchrone à double alimentation

Un intérêt croissant est accordé à la Machine Asynchrone à Double Alimentation pour plusieurs raisons :

- ✚ Un plus grand nombre de degrés de liberté liés à l'accessibilité aux variables rotoriques,
- ✚ Une plus grande souplesse de fonctionnement liée à la présence des convertisseurs statiques associés aux deux armatures,
- ✚ Une possibilité de réglage de la répartition des puissances statorique et rotorique pour optimiser les dimensions des convertisseurs,
- ✚ Un élargissement de la plage de vitesse pour un fonctionnement à flux constant et à couple maximal,
- ✚ La possibilité de faire fonctionner la machine à vitesse très faible tout en gardant des pulsations statorique et rotorique de valeurs moyennes. Cela permet de minimiser l'effet des chutes de tension résistives [15].

I.3.1 Description de la MADA

La machine asynchrone à double alimentation est aussi couramment appelée machine généralisée, car sa structure permet de considérer son comportement physique de façon analogue à une machine synchrone, à la différence près que le rotor n'est plus une roue polaire alimentée en courant continu ou un aimant permanent. Son rotor (figure I.11), est constitué d'un bobinage triphasé alimenté en alternatif. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [16][2]

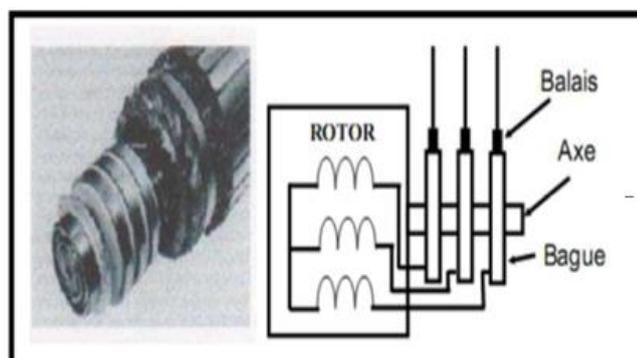


Figure I. 11 structure de rotor bobinée



Elle présente aussi un stator (figure I.12) analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrones à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. Le rotor tourne à l'intérieur de la cavité de la machine, il est séparé du stator par un entrefer.

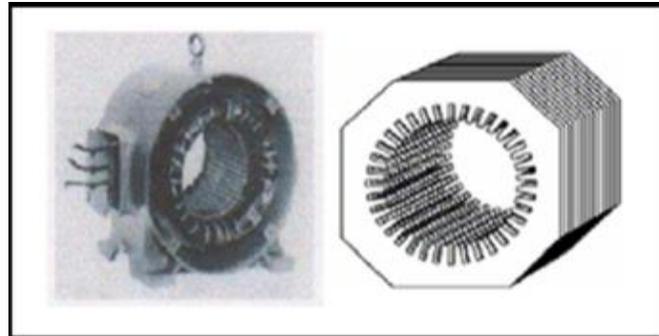


Figure I. 12 structure de stator à induction

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 I.13).

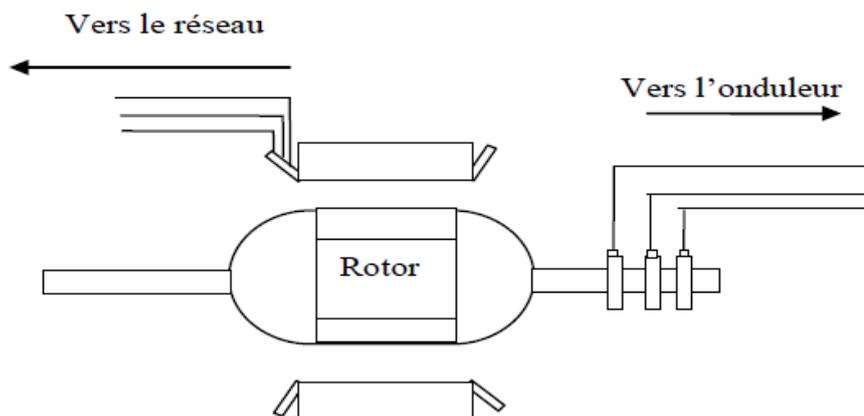


Figure I. 13 MADA connectée à deux sources triphasées

I.3.2 Modes de fonctionnement

On base sur le mode de fonctionnement où le stator est connecté directement au réseau et le rotor est alimenté par un convertisseur de puissance. Le fonctionnement de la MADA se base sur le principe du contrôle de l'écoulement de la puissance de glissement. Au lieu de dépenser en pertes Joule : la puissance rotorique, on peut la récupérer et l'injecter dans le réseau. La difficulté étant que la fréquence des courants rotoriques f_r est égale à g fois la fréquence du réseau. Durant des années cette difficulté était surmontée grâce à un groupement de machine [13],[17][4].

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



Une machine à cage doit tourner en dessous de sa vitesse de synchronisme pour être en moteur et au-dessus pour être en générateur. Ici c'est la commande des tensions rotoriques qui permet de générer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en hyper ou hypo synchronisme aussi bien en mode moteur qu'en mode générateur [6][15]. Cette propriété fondamentale a fait de la MADA le choix par excellence des entraînements à vitesse variable et surtout ces dernières années pour la génération d'énergie éolienne à vitesse variable. Nous allons présenter successivement ces différents modes de configurations fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et le rotor est relié par l'intermédiaire d'un convertisseur [15].

Les puissances (en ignorant les pertes) de la MADA peuvent être écrites par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} P_r = -gP_s \\ P_m = (1-g)P_s \end{cases} \quad (I.10)$$

Où : P_s représente la puissance statorique, P_r la puissance rotorique , P_m la puissance mécanique

➤ **Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone :** ($P_m < 0$, $P_s > 0$, $P_r < 0$)

La puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. Pour les moteurs à cage, l'énergie de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor (Figure I.14.1).

➤ **Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone :** ($P_m < 0$, $P_s > 0$, $P_r > 0$)

La puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme. Les machines à cage ne peuvent avoir ce type de fonctionnement car celui-ci ne peut être obtenu qu'à l'aide d'un accès au rotor via un circuit électronique. (Figure I.14.2)

➤ **Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone :** ($P_m > 0$, $P_s < 0$, $P_r > 0$)

La puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. Il est évident qu'un moteur à cage ne peut avoir ce type de fonctionnement, car celui-ci n'a pas d'accès permettant un apport de puissance au rotor (Figure I.14.3).

➤ **Fonctionnement en générateur hyper synchrone :** ($P_m > 0$, $P_s < 0$, $P_r < 0$)

La puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au dessus de la



vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut avoir ce mode de fonctionnement mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor (Figure I.14.4) [8], [13].

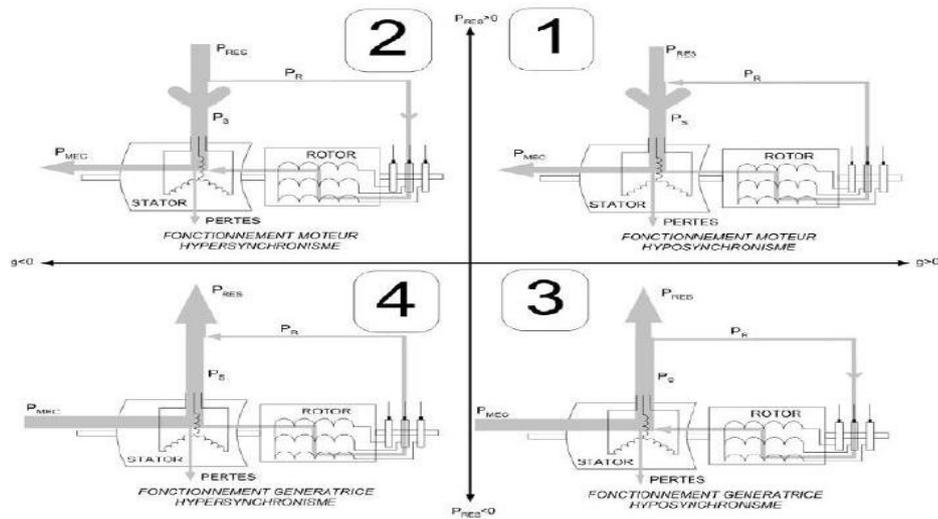


Figure I. 14 les quatre quadrants de fonctionnement de la MADA

I.3.3 Domaine d'utilisation 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 renouvelable notamment dans les systèmes éoliens [2]. Elle peut être utilisée dans des applications spécifiques avec une vitesse variable et à fréquence constante, comme les systèmes de génération de l'énergie électrique à partir des puissances éolienne et hydraulique, ainsi que dans les applications aérospatiales et navales, l'entraînement des ventilateurs et des pompes d'eau.

I.3.4 Différentes topologies de la MADA

A travers nos lectures, nous avons distingué deux types de dispositifs utilisant la machine asynchrone pour la production de l'énergie éolienne : Un dispositif tournant à vitesse fixe et utilisant un moteur à cage et un autre dispositif tournant à vitesse variable. Ce dernier est appelé communément machine asynchrone à double alimentation (MADA). Toutefois il est à noter que dans le cadre de notre étude nous avons besoin d'une machine qui offre la plage de variation de la vitesse la plus grande possible afin de maximiser le rendement. Pour cela notre recherche s'est restreinte aux topologies utilisant des convertisseurs bidirectionnels. Nous avons ainsi, pu distinguer plusieurs variantes se basant sur des architectures différentes utilisant toutes une MADA pour la conversion électromécanique.



1. Machine asynchrone à double alimentation « type brushless »

Cette machine est à double stator. Un des bobinages est directement connecté au réseau et constitue le principal support de transmission de l'énergie générée, il a une grande section. L'autre bobinage est de section moins importante. On peut contrôler la vitesse de la génératrice autour d'un point de fonctionnement en agissant sur les tensions appliquées au second bobinage statorique qui sera appelé enroulement d'excitation. Il est connecté à des convertisseurs d'électronique de puissance qui sont dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la turbine, le coût s'en trouve réduit (Figure I.15). Le rotor dans cette machine est à cage d'écureuil, cependant il a une structure différente de celle classique en boucles concentriques. Ce système n'a pas été exploité industriellement mais existe à l'état de prototype [9],[15].

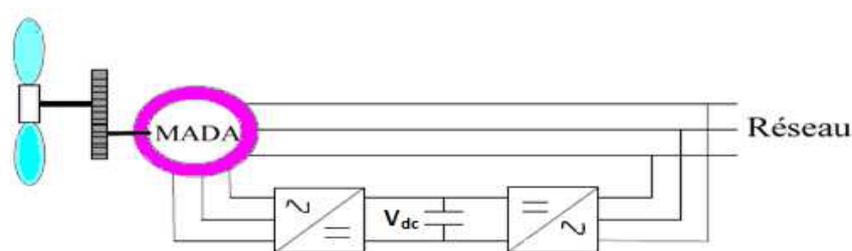


Figure I. 15 Machine asynchrone à double bobinage statorique

2. Machine asynchrone à double alimentation par le stator et le rotor

L'insertion d'un convertisseur entre le rotor et le réseau permet de contrôler le transfert de puissance entre le stator et le réseau, mais également pour les vitesses supérieures au synchronisme, du rotor vers le réseau. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance (Fig.I.16). Pour expliquer son principe de fonctionnement, en négligeant toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance P est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie, $(1-g) P$, est retrouvée sous forme de puissance mécanique ; le reste, gP sort par les balais sous forme de grandeur alternatives de fréquence gf . Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Donc le réseau reçoit $(1+g) P$. Les bobinages du rotor sont accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs. a pulsation au stator (imposée par le réseau) étant supposée constant, il est donc possible de contrôler la vitesse de la génératrice en agissant simplement sur la puissance transmise au rotor via le glissement g .

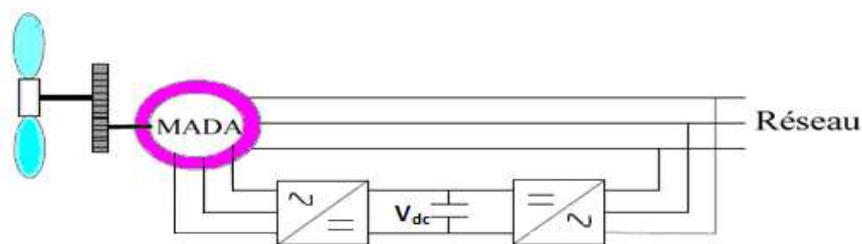


Figure I. 16 Schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée par le rotor

3. Machine asynchrone à double alimentation à énergie rotorique dissipée

Le stator est connecté directement au réseau et le rotor est connecté à un redresseur. Une charge résistive R est alors placée en sortie du redresseur par l'intermédiaire d'un hacheur à IGBT ou GTO. On peut varier le glissement par extraction d'une fraction de puissance au circuit rotorique et dissipation dans R. Cette configuration permet uniquement des faibles variations de vitesse (Fig.I.17).

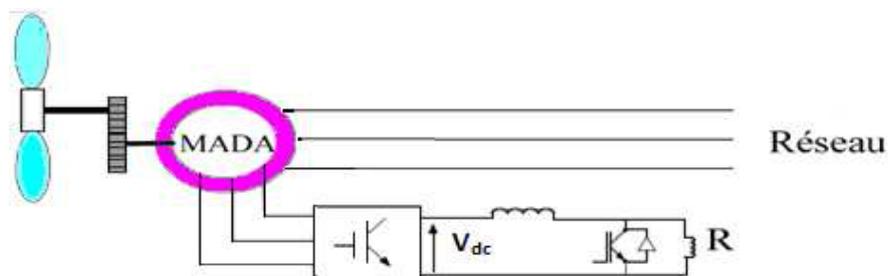


Figure I. 17 MADA avec un contrôle du glissement par dissipation de la puissance rotorique

4. Machine asynchrone à double alimentation pont à diodes et pont à thyristo « Structure de Kramer »

Cette structure consiste à utiliser un pont à diodes et un pont à thyristors, Les tensions entre bagues sont redressées par le pont à diodes. L'onduleur à thyristors non autonome applique à ce redresseur une tension qui varie par action sur l'angle d'amorçage. Ce dispositif permet de faire varier la plage de conduction des diodes, de rendre variable la puissance extraite du circuit rotorique et donc le glissement de la génératrice asynchrone (Fig.I.18) .Le principal avantage est que l'onduleur est assez classique, et moins coûteux, puisqu'il s'agit d'un onduleur non autonome dont les commutations sont assurées par le réseau.

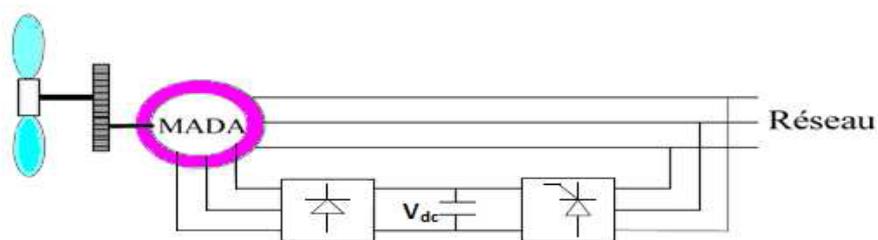


Figure I. 18 MADA alimentée par un pont à diodes et un pont à thyristors



5. Machine asynchrone à double alimentation pont à diodes et pont à transistor « Structure de Kramer » :

Les onduleurs à commutation naturelle constitués des thyristors de la structure précédente sont remplacés par des onduleurs à commutation forcée et à modulation de largeurs d'impulsions (MLI) constitués par des transistors de puissance (Fig.I.19).

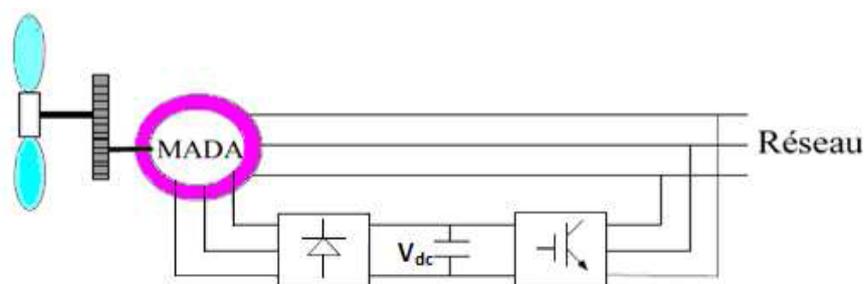


Figure I. 19 MADA alimentée par un pont à diodes et un onduleur MLI

Cette structure permet de contrôler le flux de la puissance réactive et utilise un onduleur fonctionnant à fréquence élevée, et n'injecte pas de courants harmoniques ; mais elle ne permet pas d'asservir la vitesse de la génératrice ; Ainsi elle permet de magnétiser la machine asynchrone par le biais du bus continu, ce qui alourdit le dispositif en terme de coût et de complexité de mise en oeuvre. Les enroulements statoriques du moteur sont alors soumis à des 7_7_ importantes qui peuvent réduire leur durée de vie.

6. Machine Asynchrone à Double Alimentation : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

Afin de permettre un flux d'énergie bidirectionnel entre le réseau et le rotor on utilise un cycloconvertisseur, (Fig.I.20). Cette configuration a les mêmes caractéristiques que la précédente, sauf que l'énergie de glissement peut être transférée dans les deux sens.

Le montage est conçu pour des valeurs de fréquence rotorique très inférieures à celles du réseau autrement dit pour des glissements très faibles. Ainsi, ceci permet l'utilisation des thyristors qui sont intéressants du point de vue coût. Comme le flux de puissance est bidirectionnel, il est possible de faire fonctionner la machine en génératrice ou en moteur. L'utilisation des thyristors dans ce montage implique une présence de fortes composantes harmoniques nuisant ainsi à la qualité du facteur de puissance.

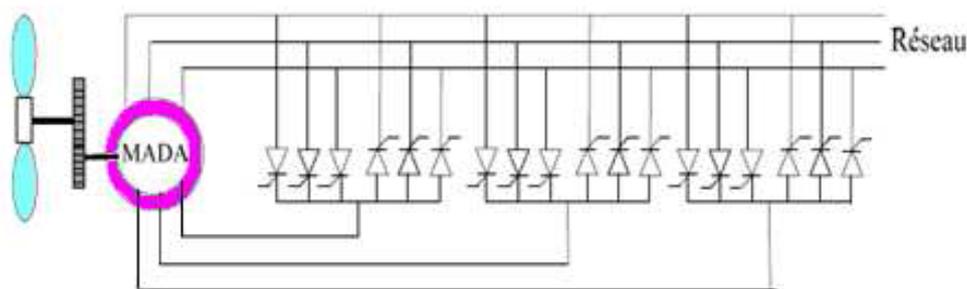


Figure I. 20 Structure de Scherbius avec cyclo convertisseur

I.3.5 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 [2] [18][19].

➤ **Avantages**

- ✚ La mesure des courants au stator et rotor, contrairement à la machine à cage, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique.
- ✚ Dans la MADA, le circuit rotorique peut être piloté par un convertisseur de fréquence de puissance relativement faible par rapport au stator. Ce convertisseur rotorique de haute commutation est utilisé pour réaliser de hautes performances dynamiques en termes de temps de réponse, de minimisation des harmoniques et d'amélioration de rendement.
- ✚ Un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation.
- ✚ 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
- ✚ Son utilisation est préférée pour ses propriétés de réglage de vitesse par action sur des résistances placées dans le circuit rotorique, et encore sa possibilité de démarrer sans demander un courant important du réseau.

➤ **Inconvénients**

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 [21]:

- ✚ Machine plus volumineuse que celle à cage, généralement elle est plus longue à causes des balais.



Chapitre I : Généralités sur les éoliennes et la MADA et les différentes structures d'alimentation de la MADA

- ✚ Nous utilisons un nombre des convertisseurs (deux redresseurs et deux onduleurs ou un redresseur et deux onduleurs) plus importants que la machine à cage (un redresseur et un onduleur).
- ✚ Le coût total de la machine asservie est plus important que celui de la machine à cage.

I.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté quelques généralités sur le système éolien en précisant les différents éléments d'une éolienne, les différents types d'éoliennes et le principe de fonctionnement. Ainsi on a présenté les avantages et les inconvénients des éoliennes. La structure de la MADA est aussi présentée, et ses différentes structures d'alimentation. La MADA se distingue au plan économique par l'utilisation de convertisseurs de plus faible puissance. Elle a l'avantage d'être flexible d'où le nom de machine généralisée. Le fonctionnement sur les quatre cadrans dans une large gamme de vitesse est l'argument majeur de sa supériorité. Grâce à une commande spécifique cette machine peut être dédiée à l'optimisation des échanges d'énergie d'où son application dans la génération d'énergie éolienne. Et on peut dire aussi que l'éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées. Et ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre. Notre choix dans le cadre de ce travail, c'est la structure cherbius avec convertisseur MLI. Elle offre une simplicité de fonctionnement et un faible coût de fabrication et de maintenance.