

## Chapitre N°02

# Intégration de l'Energie Eolienne aux Réseaux

## CHAPITRE 2 : Intégration de l'énergie éolienne aux réseaux électrique

### 2-1 Généralités sur les éoliennes

#### 2-1-1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

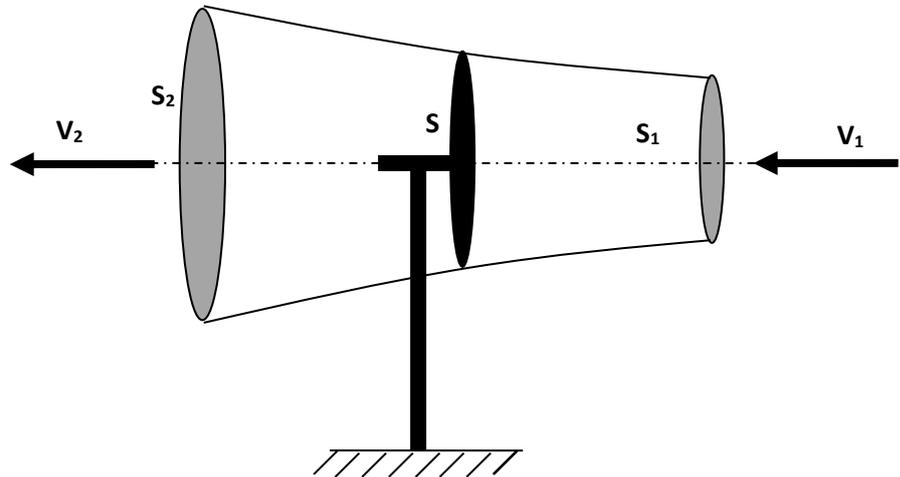


Figure 2-1: Tube de courant d'air autour d'une éolienne

#### 2-1-2 Loi de Betz

La loi de Betz détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent.

#### 2-1-3 La vitesse spécifique ou Ration de vitesse (Tip-Speed-Ratio)

On définit la vitesse spécifique ou normalisée  $\lambda$  comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine  $\Omega_t R_t$  sur la vitesse instantanée de vent  $V$  et donné par l'expression suivante:

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V}$$

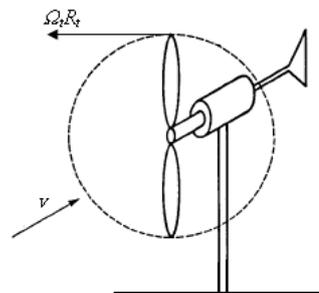


Figure 2-2 : Vitesse de vent ( $v$ ) et vitesse tangentielle de l'aube ( $\Omega_t R_t$ )

$R_i$ : Rayon de la surface balayée en m.

$V$ : Vitesse de vent en m/s.

$\Omega_i$ : Vitesse de rotation de la turbine éolienne en rad/s.

#### 2-1-4 Coefficient de puissance $C_p$

L'énergie du vent est l'énergie cinétique de l'air récupérable qui traverse une certaine surface  $S$ , la puissance associée est donc :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3$$

Cependant, cette énergie ne peut pas être entièrement récupérée, car il faut évacuer l'air qui a travaillé dans les pales du rotor. On introduit alors le coefficient de puissance  $C_p$  dans le calcul de la **puissance P** :

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot S \cdot v^3$$

$v$  : la vitesse du vent en m/s

$\rho$ : masse volumique de l'air (en Kg/m<sup>3</sup>).

$S$  : la surface d'air en m<sup>2</sup> balayée par les pales

Le coefficient  $C_p$  caractérise le niveau de rendement d'une turbine éolienne. On peut le définir comme la rapport suivant :

$$C_p = \frac{\text{Puissance disponible sur l'arbre}}{\text{Puissance disponible (récupérable) du vent}}$$

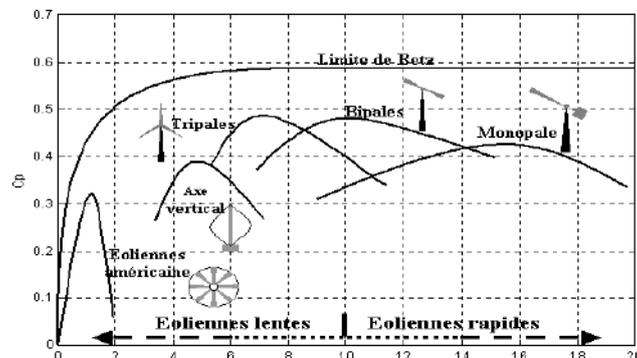
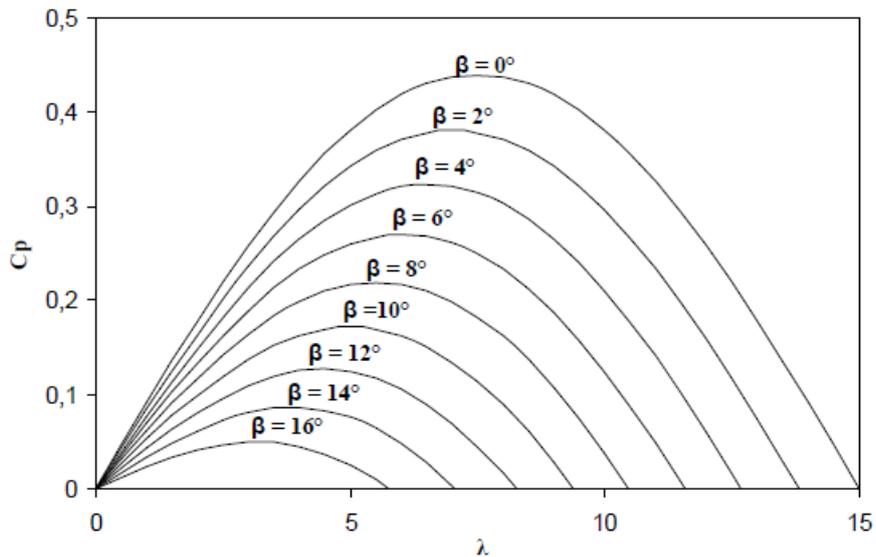


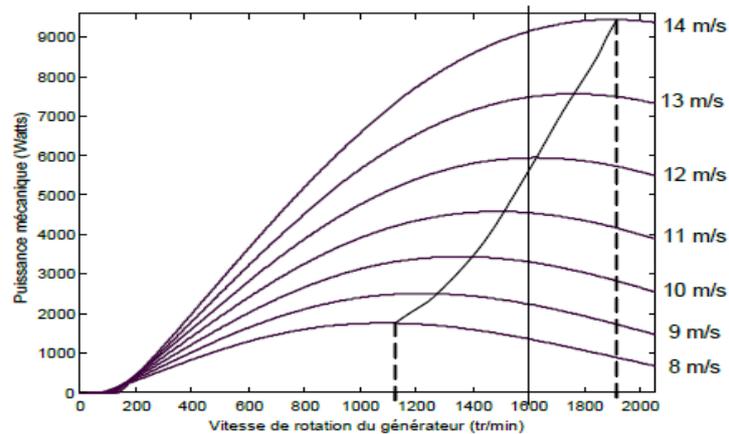
Figure 2-3 : Courbes caractéristiques des aérogénérateurs  $C_p=f(\lambda)$

Le coefficient de puissance varie avec l'angle d'orientation des pales ( $\beta$ ), l'expression de  $P_{\text{turbine}}$  montre qu'une petite variation de la vitesse de vent induit une grande variation de la puissance.



**Figure2-4 :** Coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique pour différents angles

L'expression de la puissance mécanique de la turbine permet d'établir un réseau de courbes donnant cette puissance en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses de vent.



**Figure 2-5 :** Puissances théoriques disponibles en fonction de la vitesse de vent

L'expression du couple aérodynamique est :

$$T_t = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{R_t P_m}{\lambda v} = \frac{C_p}{\lambda} \frac{1}{2} \rho \pi R_t^3 v^2$$

La valeur du coefficient de couple est déterminée par la formule suivante :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{T_t}{\frac{1}{2} \rho S_t R_t V^2}$$

$T_t$  : couple de la turbine éolienne.

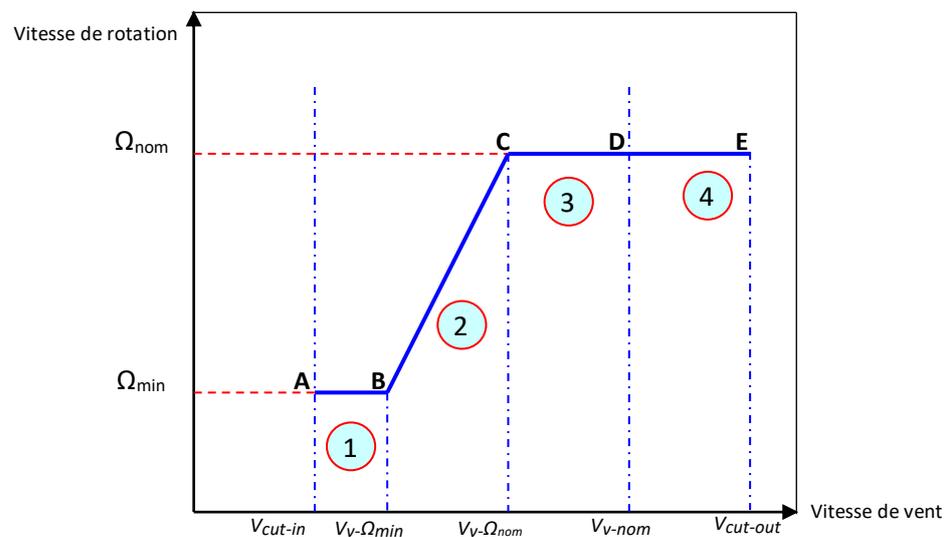
Rendement aérodynamique :

On déduit le rendement aérodynamique:

$$\eta = \frac{16}{27} C_{p \max}$$

$C_p^{\max}$  étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance  $C_p$ . Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale  $\lambda_{opt}$  pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale  $V_n$  et une vitesse de rotation nominale  $\Omega_m$ .

## 2-15 Stratégies de commande de la turbine éolienne



**Figure2-6** : Caractéristiques : vitesse de rotation, vitesse de vent

Deux stratégies de commande de la turbine à vitesses variables sont indiquées sur la figure (2-6)

- I. Stratégie d'optimisation de puissance : Dans cette stratégie représentée par les séquences « A-B-C-D », l'énergie capturée est optimisée au dessous de la vitesse nominale du vent.
- II. Stratégie de limitation de puissance : Le but de cette stratégie est de limiter la puissance nominale de la turbine au dessus de la vitesse nominale du vent « D-E ».

Quatre zones de fonctionnement de la turbine peuvent être distinguées :

- zone1 « A-B »: L'éolienne commence à fonctionner à la vitesse du vent de connexion  $V_{cut-in}$ , à une vitesse de rotation  $\Omega_{t-min}$ .
- zone2 « B-C » : Lorsque la vitesse de la génératrice est comprise entre les vitesses  $\Omega_{min}$  et  $\Omega_{nom}$ , un algorithme de commande est appliqué pour extraire la puissance maximale du vent. Le coefficient de puissance maximum correspond dans ce cas à un angle de calage optimal et constant.
- Zone3 « C-D » : Cette zone correspond au cas où la vitesse de rotation nominale est atteinte, tandis que la puissance générée arrive à des valeurs importantes mais inférieures à la puissance nominale.
- Zone4 « D-E » : Arrivée à la puissance nominale, un système d'orientation des pales « pitch control » est appliqué afin de limiter la puissance générée.
- Au-delà de la vitesse  $\Omega_{cut-out}$ , un dispositif de protection est actionné pour éviter des ruptures mécaniques.

## 2-2 Intégration de l'énergie éolienne aux réseaux électriques

### Intégration de l'énergie éolienne

#### Puissance des éoliennes - Synthèse

Puissance crête



**Machine asynchrone à double alimentation**

**Machine synchrone à aimant permanent**

**Machine synchrone à rotor bobiné**

**Eolienne à vitesse variable**

**Machine asynchrone à cage**

**Eolienne à vitesse fixe**



#### 2-2-1 Introduction

Les problèmes induits par l'intégration des turbines éoliennes dans le réseau électrique sont causés par :

- ✚ Leur production aléatoire et difficilement prévisible
- ✚ Une absence de réglage puissance-fréquence
- ✚ Une participation limitée au réglage de la tension pour les éoliennes à vitesse variable, et aucune participation à ce réglage pour les éoliennes dont la génératrice est directement couplé au réseau
- ✚ Une sensibilité importante aux variations rapides de la force du vent
- ✚ Une sensibilité élevée aux creux de tension et aux variations de fréquence ce qui entraîne souvent une déconnexion de la production lors d'incident sur le réseau. Cette déconnexion peut aggraver un déséquilibre production-consommation.

La tendance actuelle est de maintenir la connexion des éoliennes au réseau lors de creux de tension et de variation de fréquence dépassant certaines limites déterminées par le gestionnaire de réseau

## 2-2-2 Les éoliennes connectées au réseau électrique

On peut recenser deux types essentiels d'éoliennes raccordées sur les réseaux électriques :

- Les éoliennes à vitesse fixe, constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil .
- Les éoliennes à vitesse variable, constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (GADA) ou d'une machine synchrone à rotor bobiné ou à aimants permanents (MSAP).

Les générateurs (MADA et MSAP) sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage.

### 2-2-2-1 Les éoliennes à vitesse fixe

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par orientation des pales (pitch control). Généralement, ces éoliennes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement reliée à un réseau qui impose sa fréquence (50Hz) aux grandeurs statoriques. La vitesse de rotation doit rester pratiquement constante de façon à ce que la machine reste proche de la vitesse de synchronisme.

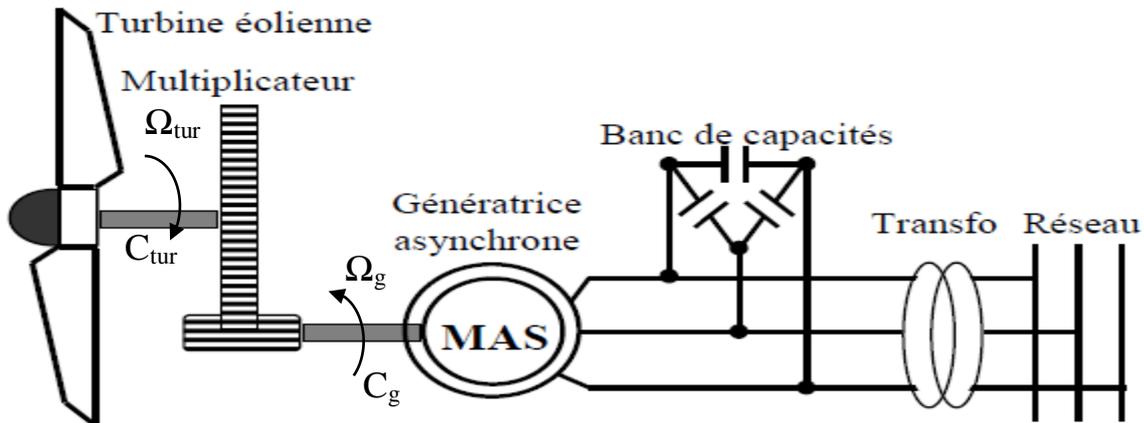
#### Caractéristiques :

- La fréquence du réseau impose la vitesse de rotation de la machine
- Peu utilisée sur site isolé
- Vitesse nominale élevée
- Fonctionnement dans une plage réduite de vitesses de vent, ses applications sont donc limitées.
- Maintien de la vitesse grâce au pitch control

## MAS à cage d'écureuil

### Généralités

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplé au réseau électrique. Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control).



**Figure 2-7** Eolienne à vitesse fixe

Caractéristiques :

- ✚ Absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues
- ✚ Ajout de capacités pour compenser l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine

**Avantages :**

- système simple et bien connu
- Economique (moins cher)
- système électrique plus simple.
- pas besoin de système électronique
- plus fiable (moins d'entretien).

**Inconvénients :**

- Pertes d'énergie à cause du multiplicateur
- Présence des efforts et oscillations du couple dans le train de puissance qui engendre des vibrations importantes
- Bruit important

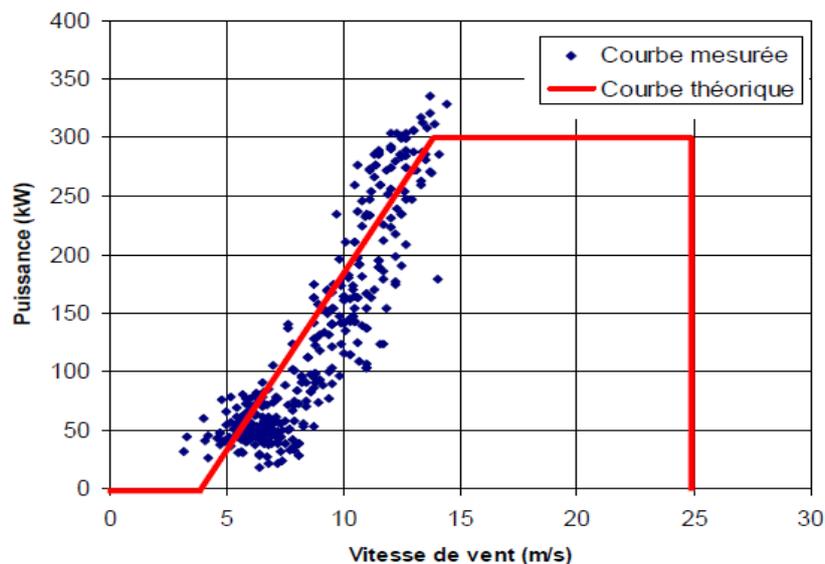
- Usure plus rapide
- Entretien de l'huile du multiplicateur (risque de fuites)
- Risque d'incendie plus élevé
- L'énergie électrique produite n'est pas forcément optimale
- difficulté de contrôler la puissance transitée au réseau
- L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone : La connexion directe au réseau d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée à ce réseau.

### Réglage de la puissance des éoliennes à vitesse fixe :

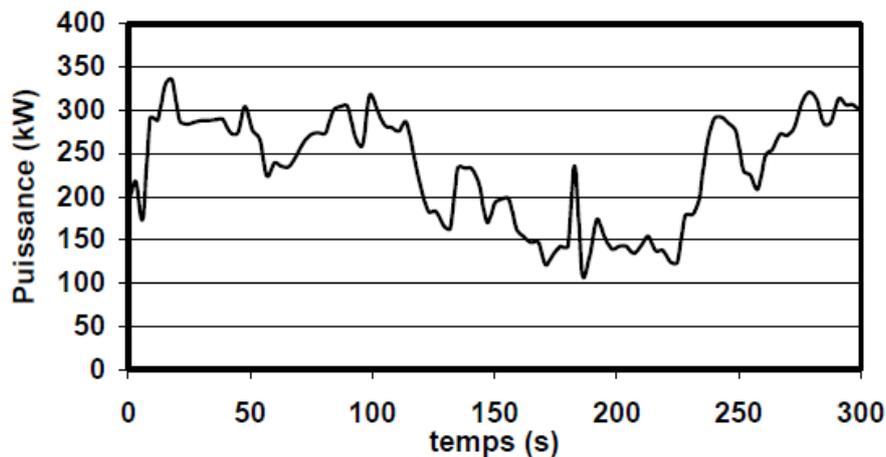
#### Exemple explicatif

La caractéristique de réglage théorique puissance-vitesse du vent est représentée en trait continu pour une éolienne de 300Kw. La dynamique relativement lente du pitch control (plusieurs dizaines de seconde) et les variations rapides de la vitesse du vent amènent ce type d'éolienne à suivre approximativement la caractéristique de réglage comme illustré par les points mesurés figure (2.8).

La figure (2.9) montre un enregistrement de la puissance générée par cette éolienne soumise à un vent moyen de 12 m/s.



**Figure2 -8** Caractéristiques de réglage d'une éolienne à vitesse fixe de puissance 300Kw



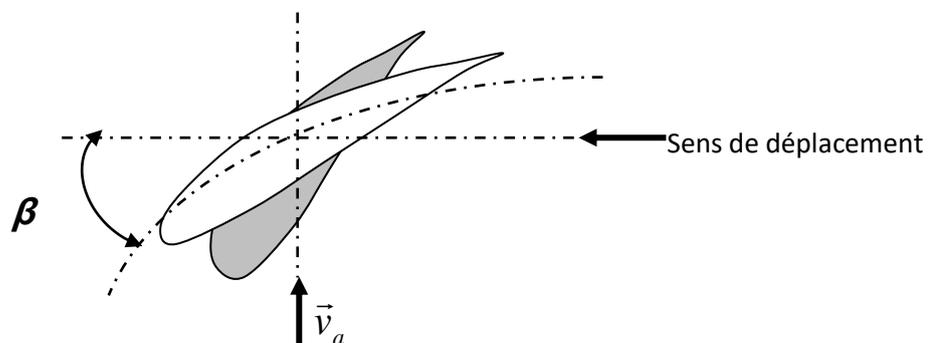
**Figure 2-9** Exemple de puissances générées par une éolienne à vitesse fixe

Cet enregistrement qui illustre le caractère très fluctuant de la puissance générée par ce type d'éolienne, montre que cette puissance peut subir des variations de plus de 100Kw en 3secondes, et que la puissance nominale peut être dépassée de plus de 10%.

Les éoliennes à vitesse fixe n'offre donc quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée, d'autant plus que la connexion directe au réseau d'une GAS nécessite l'ajout de banc de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée à ce réseau. Cependant, ce type d'éoliennes utilise plusieurs techniques pour limiter la puissance en dessus de la vitesse admissible du vent. Parmi ces techniques, on trouve :

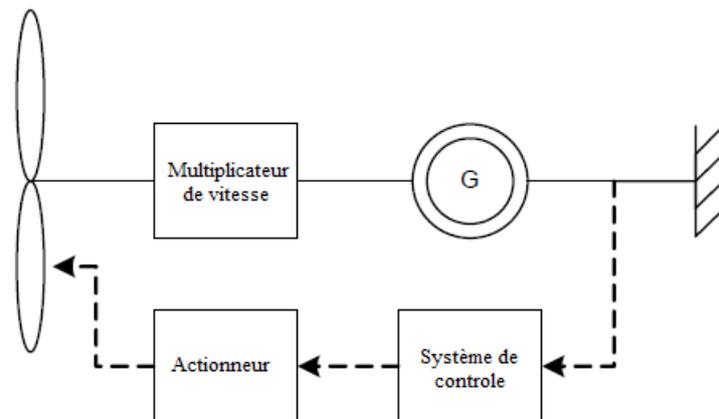
#### 1-Régulation de l'angle de calage (pitch control) :

L'augmentation de la vitesse du vent s'accompagne automatiquement d'une diminution de l'angle de calage afin de permettre le décrochage aérodynamique de la turbine aux vitesses du vent plus grandes que la vitesse nominale.



**Figure 2-10** : Variation de l'angle de calage d'une pale

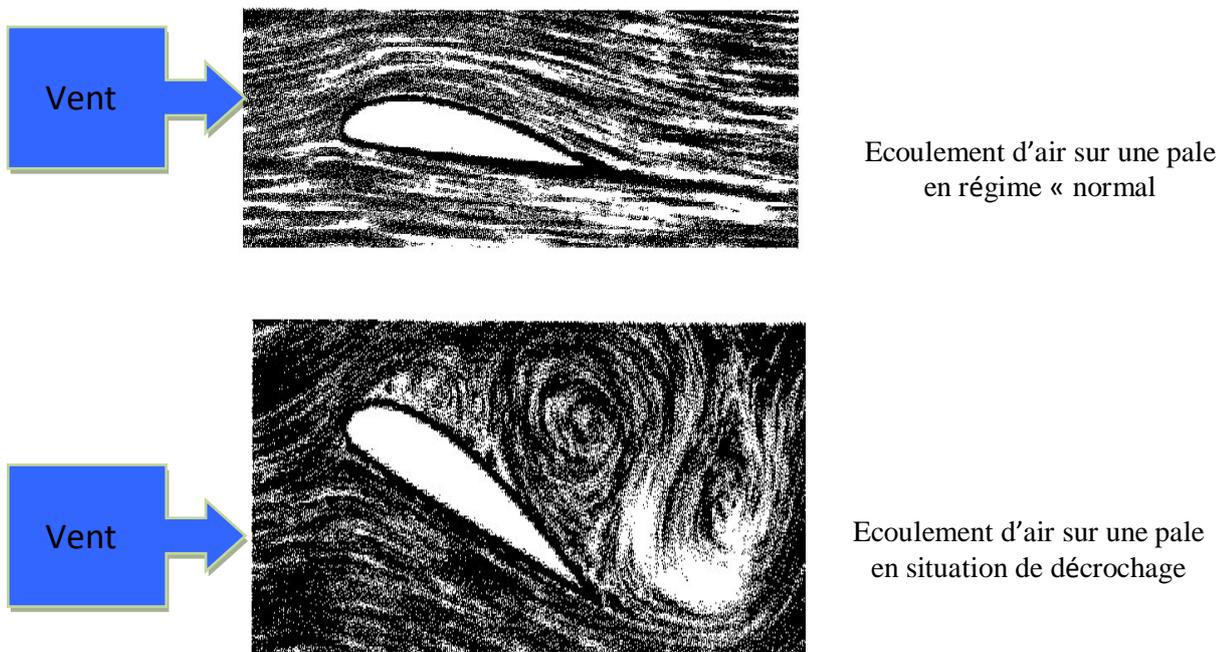
La figure 2-12 illustre le principe du mécanisme de contrôle du système d'orientation des pales.



**Figure 2-11** : Système d'orientation des pales (pitch control)

2-Limitation par décrochage aérodynamique (*Stall regulation*):

Certaines éoliennes de ce type sont équipées d'un système à décrochage aérodynamique des pales (*stall control*). L'angle de calage est ainsi fixe, mais les performances aérodynamiques des pales sont conçues pour se décrocher à des grandes vitesses de vent figure (2-12). La structure du rotor de la turbine est ainsi simple, mais les possibilités de réglage de la puissance sont plus limitées.



**Figure 2-12** : Système de décrochage aérodynamique (Stall control)

### 3-Décrochage aérodynamique assisté, (Assisted Stall regulation) :

Les pales peuvent tourner lentement autour l'axe longitudinal, mais le mécanisme principal de contrôle utilise le principe de décrochage aérodynamique.

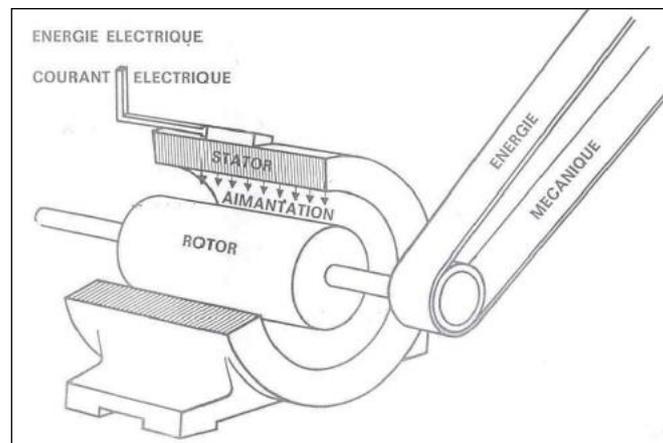
### 4-Control par déviation : (Yaw control) :

Cette technique de control est peu utilisée. La nacelle entière tourne autour la tour pour faire dévier le rotor du vent

### **Principe de fonctionnement du générateur asynchrone :**

Pour ce type de générateur utilisé dans les systèmes éoliens, le rotor est souvent à cage d'écureuil. Le champ magnétique tournant dans les bobines extérieures crée des courants de Foucault au rotor grâce au phénomène d'induction. Le rotor développe ainsi son propre champ magnétique. De plus, ce dernier doit posséder des caractéristiques de rémanence magnétique pour assurer un démarrage correct de la production d'énergie.

Si le réseau n'est pas présent comme source de courant, il faut alors envisager l'utilisation de batteries de condensateurs ou d'un dispositif annexe (batteries, groupe Diesel + alternateur) pour pouvoir démarrer la production d'électricité.



**Figure 2-13 :** Schéma simplifié d'une machine asynchrone

### **Fréquence et glissement :**

Supposons qu'un moteur à induction à P paires de pôles absorbe des courants triphasés équilibrés.

Ceux-ci créent un champ tournant à la **vitesse**  $\omega_{syn}$  dite **de synchronisme**.

$$\omega_{syn} = \frac{\omega_s}{p}$$

$$N_{syn} = \frac{60 \cdot f_s}{P}$$

$\omega_{syn}$  (rd/s) ou  $N_{syn}$  (tr/mn) : vitesse de rotation du champ tournant (synchronisme).

$\omega_s$  (rd/s): Pulsation des courants statoriques.

$f_s$  (Hz) : Fréquence des courants statoriques.

P : Nombre de paires de pôles.

Le fonctionnement de la machine asynchrone est caractérisé par la relation suivante :

$$\omega_s - \omega_{syn} = P \cdot \omega_m$$

En pratique, on utilise un autre paramètre, g, appelé le glissement.

On peut définir le glissement tout d'abord comme le rapport entre les fréquences des courants induits dans le rotor et les courants du stator :

$$g = \frac{\omega_r}{\omega_s} = \frac{f_r}{f_s}$$

On déduit alors la relation suivante définissant le glissement comme étant la différence relative entre la vitesse de synchronisme et la vitesse de la machine.

$$g = \frac{N_{syn} - N_m}{N_{syn}} = \frac{\omega_{syn} - \omega_m}{\omega_{syn}} = 1 - \frac{\omega_m}{\omega_{syn}} = \frac{\omega_r}{\omega_s}$$

$\omega_{syn}$  (rd/s) ou  $N_{syn}$  (tr/mn) : Vitesse de rotation du champ tournant (synchronisme).

$\omega_m$  (rd/s) ou  $N_m$  (tr/mn) : Vitesse de rotation de la machine.

$\omega_r$  (rd/s) : Pulsations des courants rotoriques

$\omega_s$  (rd/s) : Pulsation des courants statoriques.

- Lorsque ce générateur est connecté au réseau, il se met à tourner à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de rotation du champ magnétique dans le stator (fonctionnement de type « moteur »).

On a donc :

$$0 \leq \omega_m \leq \omega_{syn} \text{ et } 1 \geq g \geq 0$$

- Si la vitesse de rotation du rotor devient égale (synchrone) à celle du champ magnétique, aucune induction n'apparaît dans le rotor, et donc aucune interaction avec le stator.

- Si la vitesse de rotation du rotor est légèrement supérieure à celle du champ magnétique du stator,

$$\omega_m > \omega_{syn} \quad \text{et} \quad 0 < g$$

Il se développe alors une force électromagnétique d'induction dans les bobines statoriques, créant ainsi un courant triphasé.

### Schéma équivalent de la MAS

La machine asynchrone est finalement constituée de deux ensembles de bobinages triphasés enroulés sur le même circuit magnétique. Par analogie, on peut alors considérer qu'elle est équivalente, à l'arrêt, à un transformateur triphasé.

Il est instructif de développer un circuit équivalent représentant chaque phase de la machine à induction.

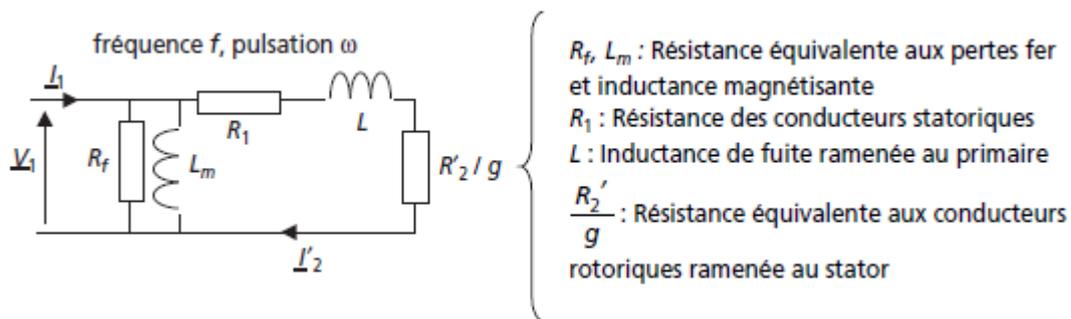
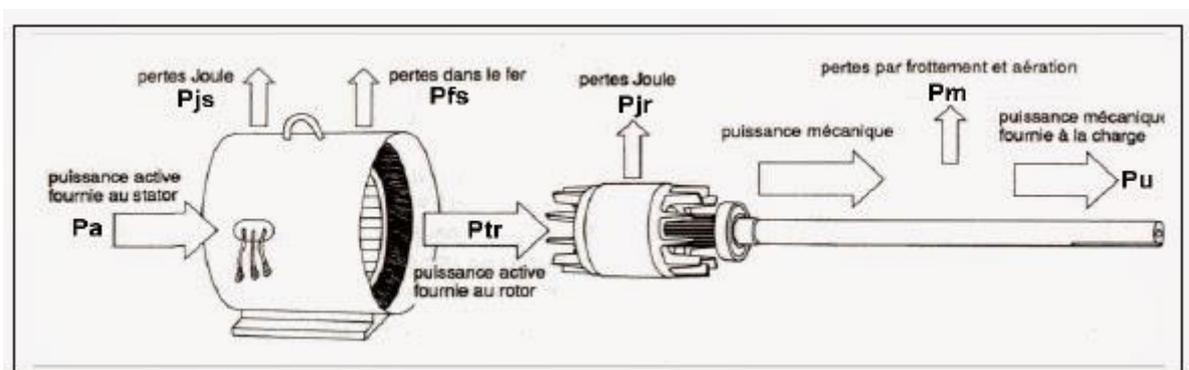


Figure 2-14 : Schéma électrique équivalent pour MAS

### Bilan de puissances de la MAS



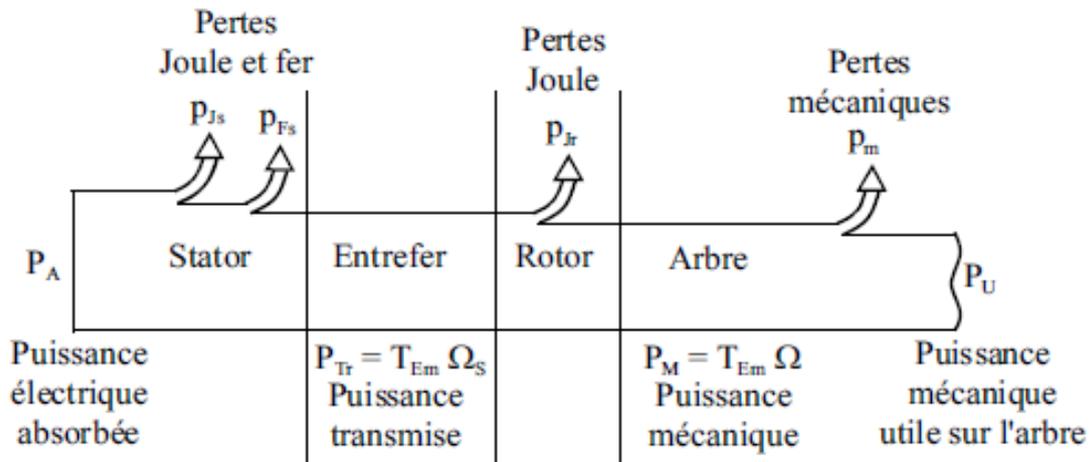


Figure 2-15 : Arbre des puissances pour MAS

Bilan de puissance d'un générateur asynchrone

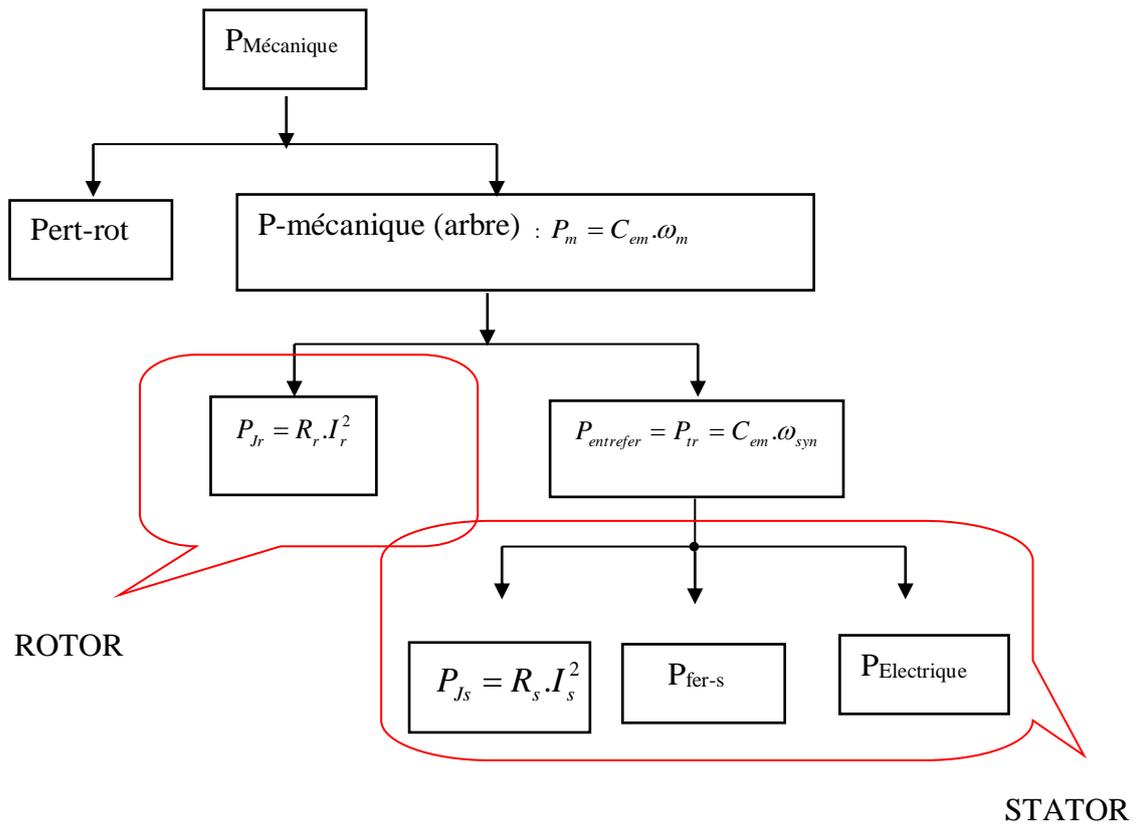


Figure 2-16 : Bilan énergétique de la GAS

**Expression du couple en fonction du glissement :**

Le couple électromagnétique de la MAS est donnée en fonction du glissement par :

$$C = \frac{3 \cdot V_1^2 \cdot R_2'}{\Omega_s \cdot g} \cdot \frac{1}{\left(R_1 + R_2' / g\right)^2 + L^2 \omega^2}$$

- Si le glissement est faible, on retient :

$$C \approx \frac{3 \cdot V_1^2 \cdot g}{R_2' \cdot \Omega_s}$$

- On calcule aussi le couple de démarrage en remplaçant  $g$  par la valeur 1.
- La valeur maximale du couple est trouvée en cherchant la valeur de  $g$  qui maximise l'expression de  $C$ , valeur ensuite implantée dans l'expression précédente. On retiendra uniquement le résultat :

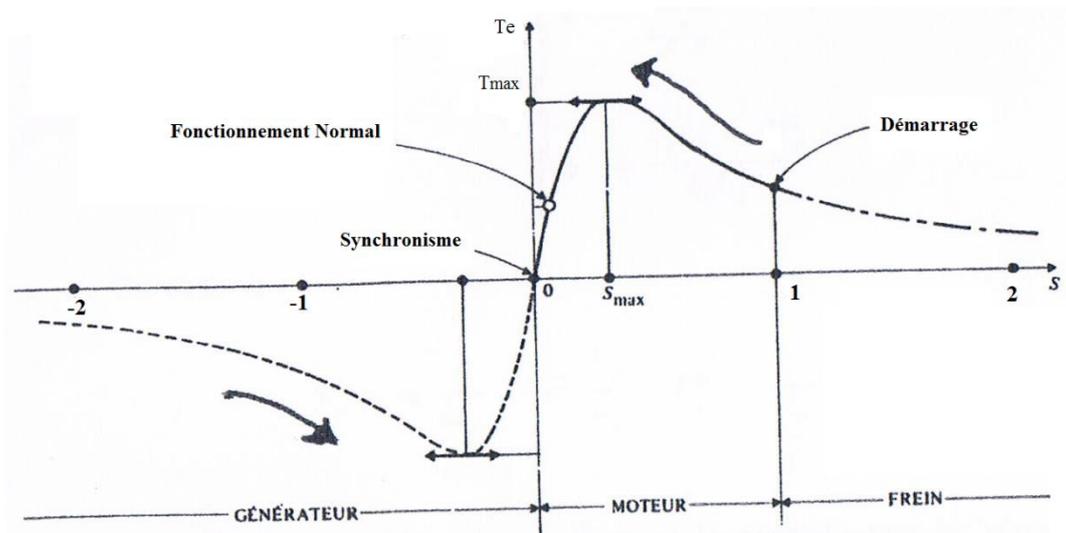
$$C_{\max} = \frac{3 \cdot V_1^2}{2 \cdot \Omega_s} \cdot \frac{1}{R_1' + \sqrt{R_1^2 + L^2 \omega^2}}$$

- Si on néglige la valeur de la résistance des bobinages statoriques, et c'est souvent le cas, on obtient la formule simple à retenir :

$$C_{\max} = \frac{3 \cdot V_1^2}{2 \cdot \Omega_s \cdot L \omega}$$

Courbe : Couple-vitesse de rotation

La relation typique entre le couple, la vitesse de rotation, et le glissement est présentée sur la figure 2.16, et la figure 2.17. À l'arrêt la vitesse est nulle et le glissement,  $s$ , est égal à 1. Entre les deux valeurs de glissement ( $g=1$  et  $g=0$ ), la machine fonctionne en mode moteur. Au-delà de la vitesse de synchronisme ( $g=0$ ), la machine fonctionne en mode générateur.



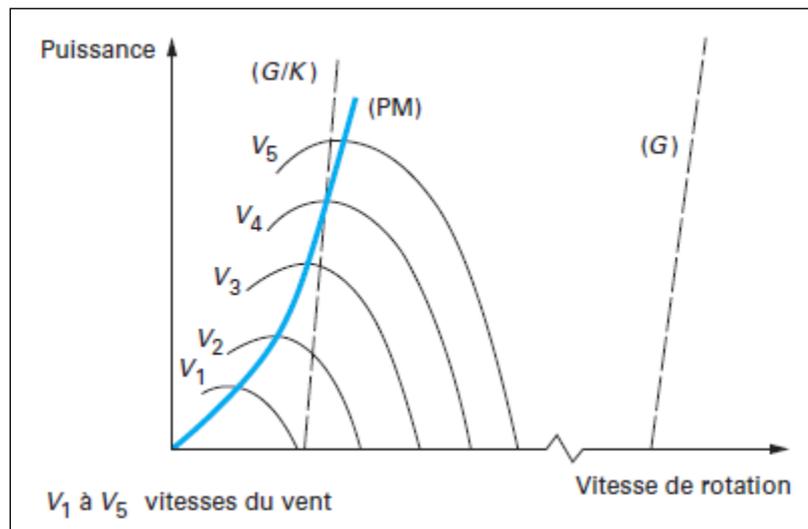
**Figure 2-17 :** Couple électromagnétique d'une machine asynchrone en fonction du glissement : Modes de fonctionnement

## MPPT pour GAS

### Choix du rapport de multiplication

La vitesse de rotation du générateur d'une éolienne dépend du nombre de pôles qu'il comprend. Un générateur devra tourner à 1 500 tr/min s'il possède quatre pôles, 750 tr/min si huit pôles..... Etant donné qu'il y a une très forte différence entre la vitesse de rotation des pales de la machine (environ 40 tr/min pour une machine de 40 m de diamètre) et le régime de rotation nécessaire au bon fonctionnement du générateur.

La présence d'un multiplicateur s'impose donc entre le rotor de l'éolienne et le générateur. Le rapport de ce multiplicateur doit être choisi de façon à ce que la production d'énergie soit maximale pour une large gamme de vitesse de vent. Le choix peut s'effectuer à l'aide du graphique présenté sur la figure 2-18 .



**Figure 2-18 :** Rapport du multiplicateur

Le réseau de courbes représente la puissance mécanique développée par le rotor de l'éolienne en fonction de sa vitesse de rotation pour différentes vitesses de vent. La courbe repérée *PM* joint les points de puissance maximale. La courbe repérée *G* illustre la puissance produite par le générateur (cette courbe est ici légèrement inclinée pour tenir compte du glissement d'un générateur asynchrone). Le rapport de multiplication *K* est donc choisi pour que la courbe *G/K* soit la plus proche possible de la courbe *PM*.

### Les éoliennes à vitesse variable

L'intérêt de l'utilisation d'un générateur à vitesse de rotation variable est l'augmentation de la production de puissance électrique, du fait de la possibilité pour le générateur de fonctionner correctement pour une large gamme de vitesses de vent.

L'éolienne est connectée au réseau par l'intermédiaire d'un **dispositif électronique**. Le générateur, synchrone ou asynchrone, produit du courant alternatif.

#### Avantages principaux de ce type:

- 1- Optimisation de l'énergie captée grâce à la possibilité de contrôler la vitesse du rotor.
- 2- Contrôle du transfert de puissance et énergie propre envoyée au réseau.
- 3- Réduction des contraintes mécaniques subites par le train de puissance. Les turbulences et rafales de vent peuvent être absorbées, l'énergie absorbée du vent

est donc emmagasinée dans l'inertie mécanique de la turbine, réduisant ainsi les oscillations de couple

- 4- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.
- 5- Ce type de machine offre une constante de temps plus grande du système de contrôle de l'angle de calage, ce qui réduit sa complexité
- 6- Réduction des bruits acoustiques.

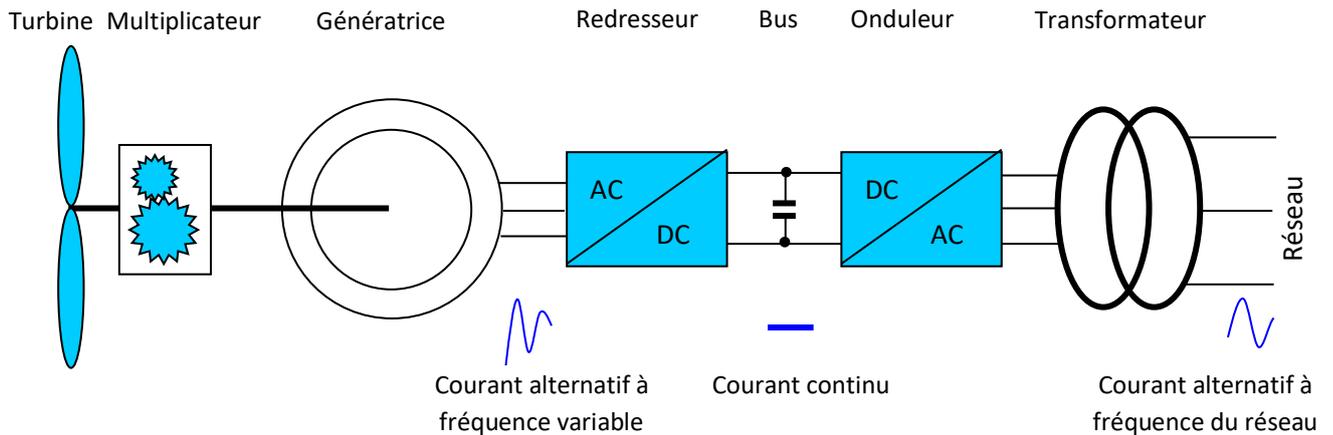
#### **Inconvénients :**

- 1- Utilisation de machines spéciales.
- 2- Coûts supplémentaires plus importantes (convertisseur, commande,...).
- 3- Complexité des convertisseurs de puissance utilisés.
- 4- Gestion du transfert de puissance entre les convertisseurs, et placement au point de puissance optimum de l'éolienne.

#### **Topologies des convertisseurs électriques utilisés**

Grâce au développement très rapide de l'électronique de puissance, offrant à la fois, une grande capacité, et une bonne qualité de puissance, avec le moindre de coûts; le domaine de l'énergie éolienne a connu une large utilisation des convertisseurs de puissance. Des nouveaux types de génératrices associées à ces convertisseurs sont en cours de développement. L'utilisation des convertisseurs de puissance dans le système de conversion d'énergie éolienne permet, non seulement, d'obtenir la forme souhaitée de l'énergie électrique, mais aussi d'optimiser la puissance prélevée.

Plusieurs structures de conversion de l'énergie électrique fournie par la génératrice éolienne à vitesses variables peuvent être utilisées dans le but d'avoir une tension de fréquence et amplitude constants du côté réseau. Ces structures sont basées sur des dispositifs électroniques.



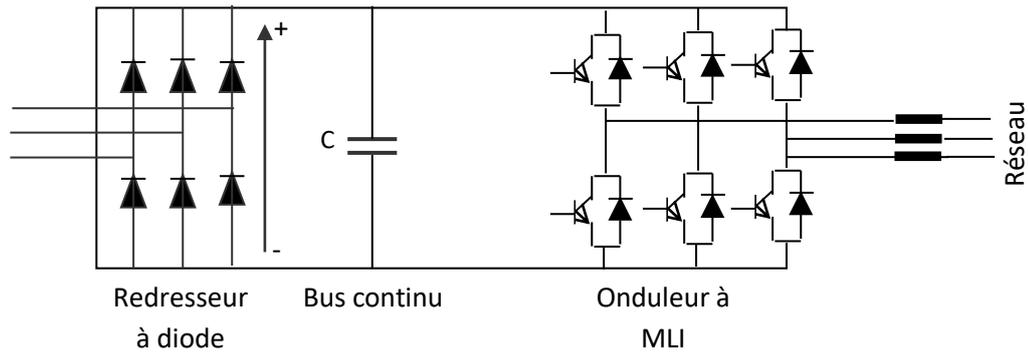
**Figure 2-19:** Exemple d'une éolienne à vitesses variables connectée au réseau via des convertisseurs statiques.

L'emploi de deux convertisseurs de puissance permet de découpler la fréquence du réseau de la fréquence variable des courants de la machine, par la création d'un bus continu intermédiaire. Avec une telle structure, les fluctuations rapides de la puissance générée peuvent être filtrées par le condensateur en autorisant une variation de la tension du bus continu sur une plage donnée.

Selon la topologie des convertisseurs utilisés, on peut décrire les structures couramment utilisées dans les chaînes de conversion éoliennes raccordé au réseau :

#### **Alimentation utilisant redresseur à diodes et onduleur contrôlé par MLI**

Dans le souci de réduction des coûts, le pont de diodes, peu onéreux, semble attractif dans les faibles puissances à condition que les performances énergétiques ne soient pas trop dégradées. Le redresseur à diodes est placé dans cette topologie entre le bus continu et la génératrice, et un onduleur à fréquence fixe contrôlé par MLI placé entre le bus continu et le réseau de distribution (figure 2-20).

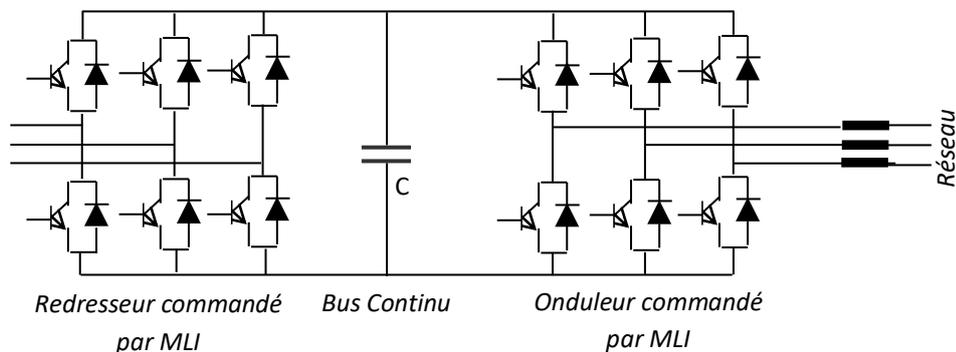


**Figure 2-20 :** Structure avec un redresseur à diodes et onduleur commandé par MLI

### Alimentation utilisant (redresseur et onduleur) contrôlés par MLI

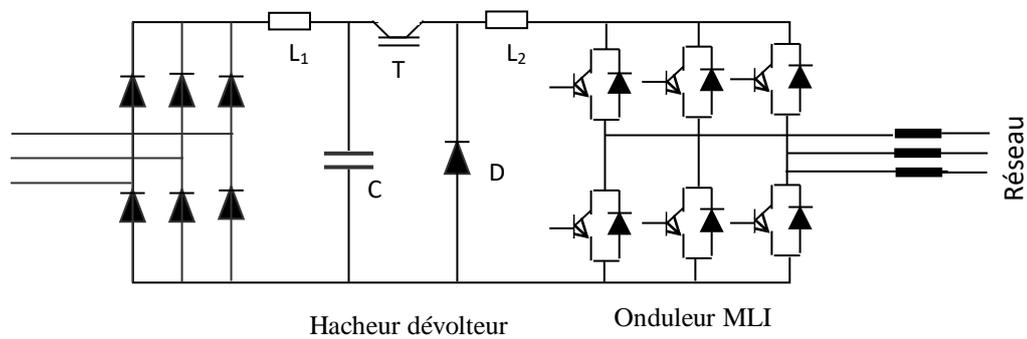
Pour cette structure, le redresseur à diode est remplacé par un convertisseur à modulation de largeur d'impulsions fonctionnant à fréquence variable. La génératrice est alors parfaitement contrôlée, et il est possible d'extraire un maximum de puissance de la turbine éolienne par le biais d'un contrôle du courant dans la génératrice, pilotant ainsi le couple électromagnétique et/ou La vitesse de rotation. Un deuxième convertisseur à MLI connecté au réseau est nécessaire pour générer des grandeurs à fréquence fixe sur le réseau et contrôler les transits de puissance.

Le redresseur devant fournir sous la tension de batterie un courant variable en fonction de la charge, et comme la tension de la batterie est susceptible de varier, celui-ci doit être contrôlable en courant.



**Figure 2-21:** Structure avec deux convertisseurs commandés par MLI

### Structure avec redresseur, hacheur dévolteur, et onduleur à commande par MLI



**Figure 2-22 :** Structure avec redresseur, hacheur dévolteur, et onduleur MLI

Cette structure consiste à optimiser la puissance côté continue en associant un convertisseur DC/DC à un redresseur à diodes. Par ce procédé, la puissance éolienne peut être indirectement contrôlée par un contrôle du courant de sortie du hacheur, dans le cas d'un dévolteur, et du courant d'entrée pour un survolteur.

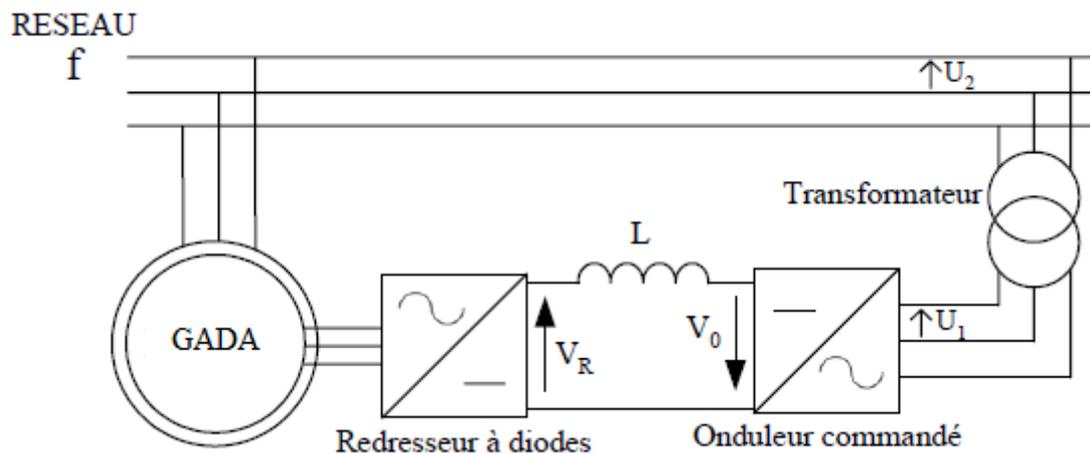
Actuellement, les configurations d'éoliennes à vitesse variable les plus courantes sont:

#### **Machine Asynchrone à double alimentation (DFIG)**

La configuration typique d'une éolienne GADA est représentée schématiquement sur la Figure 2.23.

Elle utilise un générateur d'induction à rotor bobiné avec des bagues collectrices pour prendre le courant dans ou hors de l'enroulement du rotor. Le fonctionnement à vitesse variable est obtenu en injectant une tension contrôlable dans le rotor à la fréquence de glissement.

L'enroulement du rotor est alimenté par un convertisseur de puissance à fréquence variable, généralement basé sur deux convertisseurs de source de tension (VSC) à base de transistors bipolaires (IGBT) reliés par un bus CC. Le convertisseur de puissance dissocie la fréquence électrique du réseau de la fréquence mécanique du rotor, ce qui permet le fonctionnement à vitesse variable de l'éolienne.



**Figure 2-23 :** GADA, structure Scherbius avec convertisseurs MLI

### Principe de Fonctionnement :

La Génératrice Asynchrone double alimentée (GADA) peut fournir de l'énergie au réseau à travers le stator et le rotor, tandis que le rotor peut également absorber la puissance. Cela dépend de la vitesse de rotation du générateur.

La Figure 2-24 montre les différentes configurations de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur.

-Si le générateur fonctionne en mode Hyperynchronisme , la puissance sera délivré par le rotor via les convertisseurs vers le réseau,

-Si le générateur fonctionne en mode Hyposynchronisme, le rotor absorbe l'énergie du réseau à travers les convertisseurs.

$\omega_{syn}$  : Vitesse de synchronisme.

$\omega_r$  : Vitesse de rotation du rotor

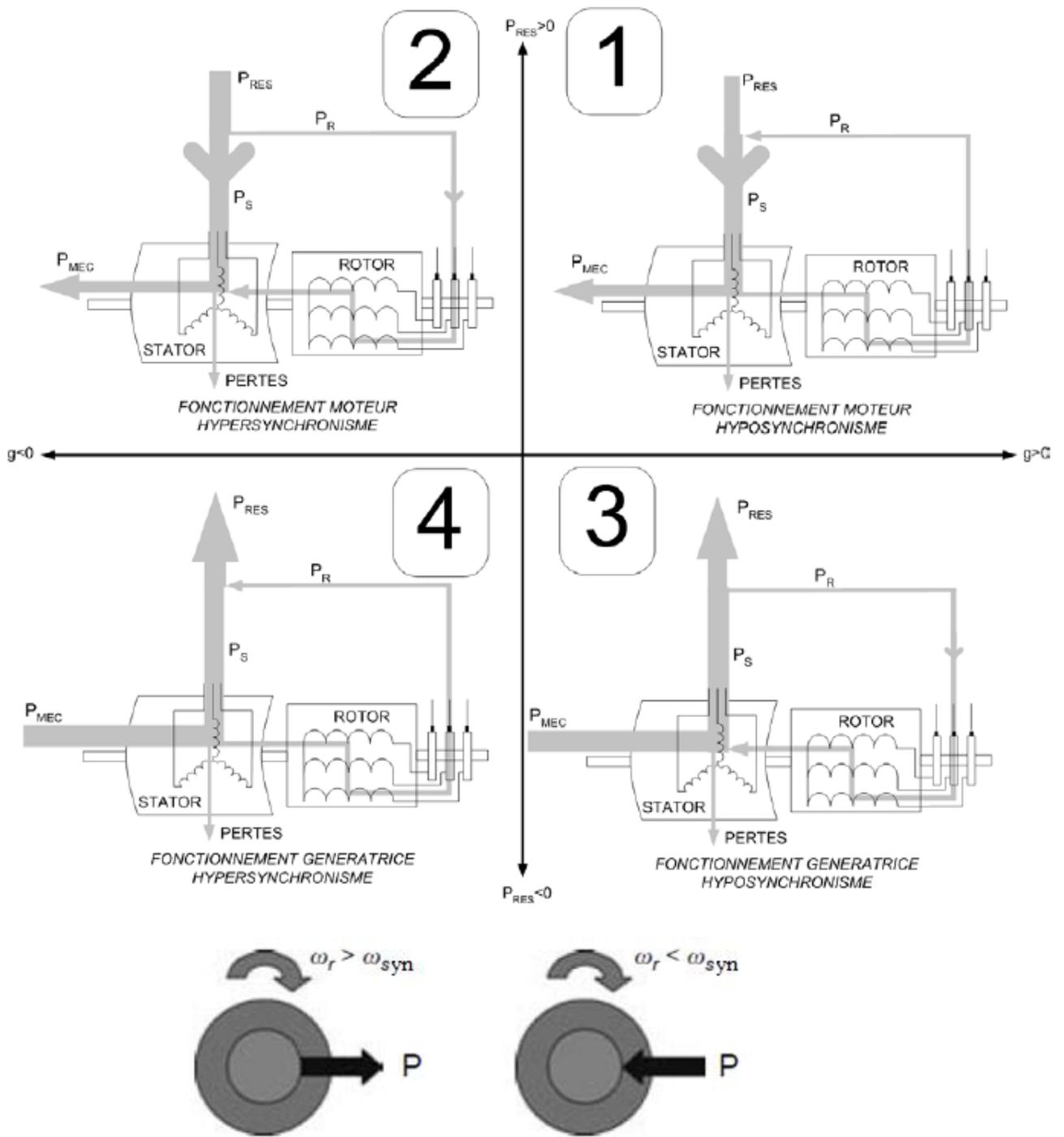
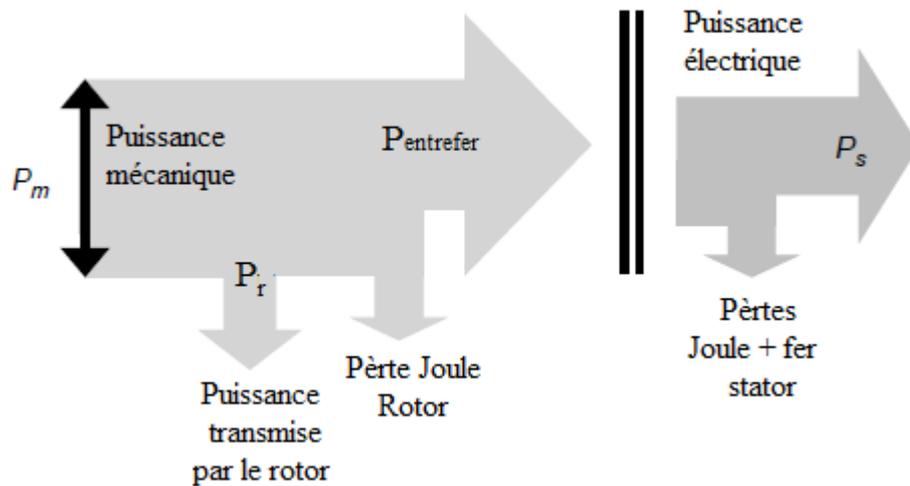


Figure 2-24 : Quadrants de fonctionnement de la MADA

En régime permanent, la relation entre la puissance mécanique, la puissance électrique du rotor, et la puissance électrique du stator est illustrée à la Figure 2.25



**Figure 2-25** : Bilan de puissance de la GADA

$P_m$  : Puissance mécanique fournie au générateur,

$P_r$  : Puissance délivré par l'arbre,

$P_{entrfer}$  : Puissance à l'entrefer du générateur,

$P_s$  : Puissance délivrée par le stator.

$P_g$  : Puissance totale générée et délivrée au réseau.

Si on néglige les pertes statoriques, on obtient :

$$P_{entrfer} = P_s$$

Si on néglige les pertes rotoriques, on obtient :

$$P_{entrfer} = P_m - P_r$$

La puissance statorique peut s'exprimer donc par :

$P_s = P_m - P_r$  ; cette équation peut s'exprimer en fonction du couple du générateur  $T$  par :

$$T\omega_{syn} = T\omega_r - P_r \text{ ou : } P_s = T\omega_{syn} \text{ , et } P_m = T\omega_r$$

En réarrangeant les termes, on obtient :  $P_r = -T(\omega_{syn} - \omega_r)$

Les puissances du stator et du rotor peuvent ensuite être reliées par les glissements  $g$  :

$$P_r = -gT\omega_{syn} = -gP_s \text{ , avec : } g = \frac{(\omega_{syn} - \omega_r)}{\omega_s}$$

On obtient alors :  $P_m = P_s + P_r$

$$P_m = P_s - gP_s$$

$$P_m = (1-g)P_s$$

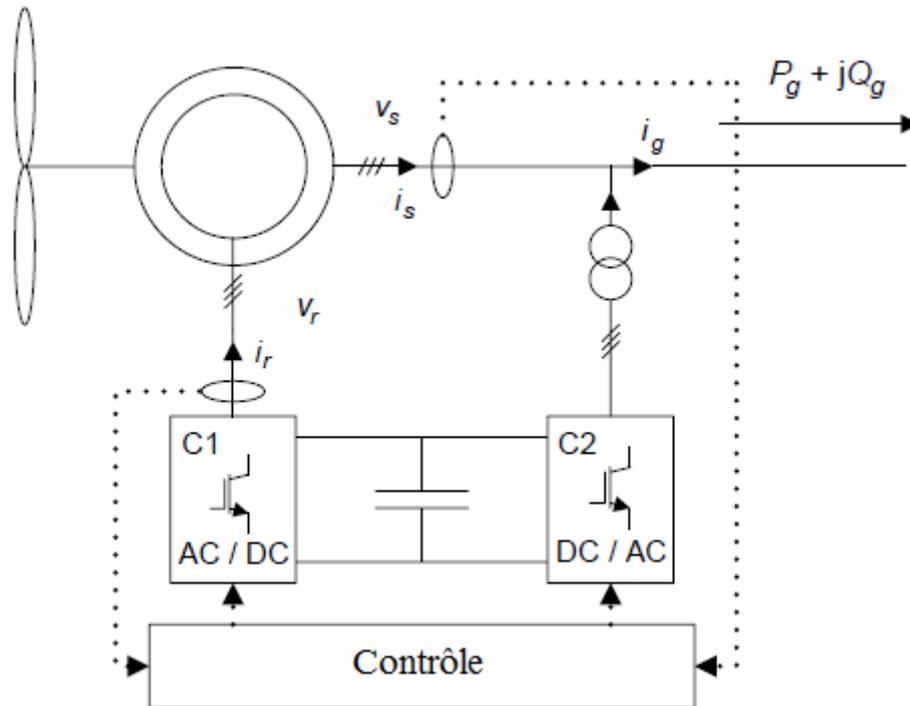
La puissance totale délivrée au réseau ( $P_g$ ) est donc :

$$P_g = P_s + P_r$$

La plage contrôlable de  $g$  détermine la taille des convertisseurs pour la GADA.

### Contrôle du système éolien avec GADA

Le contrôle du système éolien avec GADA se fait par les deux convertisseurs C1, C2 de la figure 2-26



**Figure 2-26** : Contrôle du système éolien avec GADA

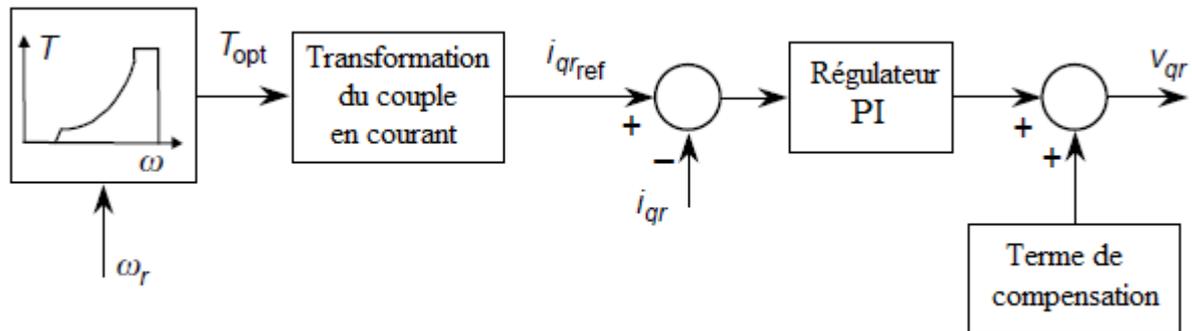
Un système de contrôle mis en œuvre par un certain nombre de fabricants utilise le convertisseur C1 pour contrôler le couple / vitesse, ainsi que la tension ou le facteur de puissance pour l'ensemble du système.

Le convertisseur C2 est utilisé pour maintenir la tension du bus continu et fournir un chemin pour le flux de puissance du rotor vers et depuis le réseau avec un facteur de puissance unitaire.

### Boucles de régulation

La mise en œuvre de la commande de couple de la GADA est illustrée à la figure 2-27. Compte tenu de la mesure de la vitesse du rotor, la caractéristique couple-vitesse (Figure 2-30) est utilisée pour obtenir le couple optimal,  $T_{opt}$ , qui après quelques manipulations génère un courant de référence  $I_{qr_{ref}}$

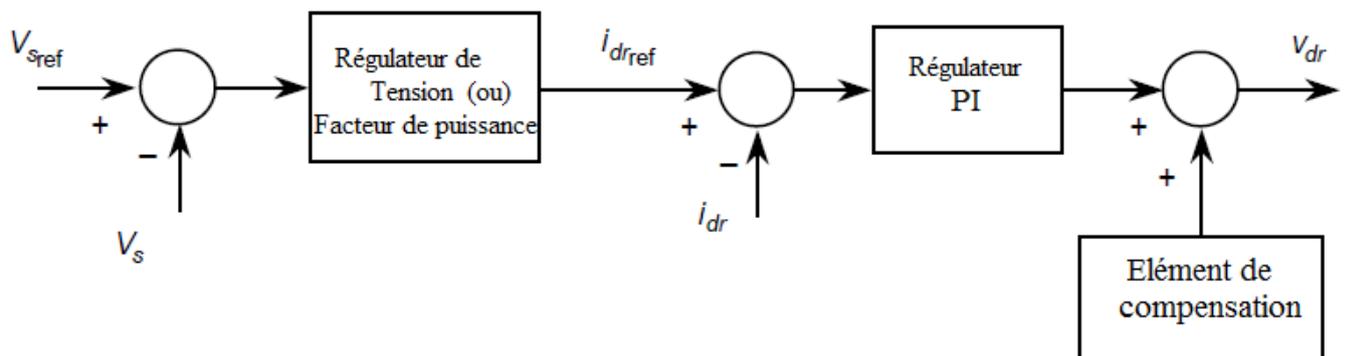
En comparant le courant de référence  $I_{qr\text{ref}}$  à la valeur réelle du courant rotorique dans l'axe q,  $I_{qr}$ , on obtient un signal d'erreur. Bien que  $I_{qr}$  impose l'effet du contrôle de couple, le convertisseur C1 (Figure 2-26) est utilisé comme une source de tension contrôlée. Par conséquent, la tension de rotor requise  $v_{qr}$  est obtenue en traitant le signal d'erreur avec un régulateur standard PI et en ajoutant à la sortie un terme de compensation pour minimiser le couplage entre les boucles de contrôle de couple et de tension.



**Figure 2-27** : Boucles de régulation du couple

### Contrôle de tension

Une implémentation de base du régulateur de tension de la GADA est représentée sur la Figure 2.28.



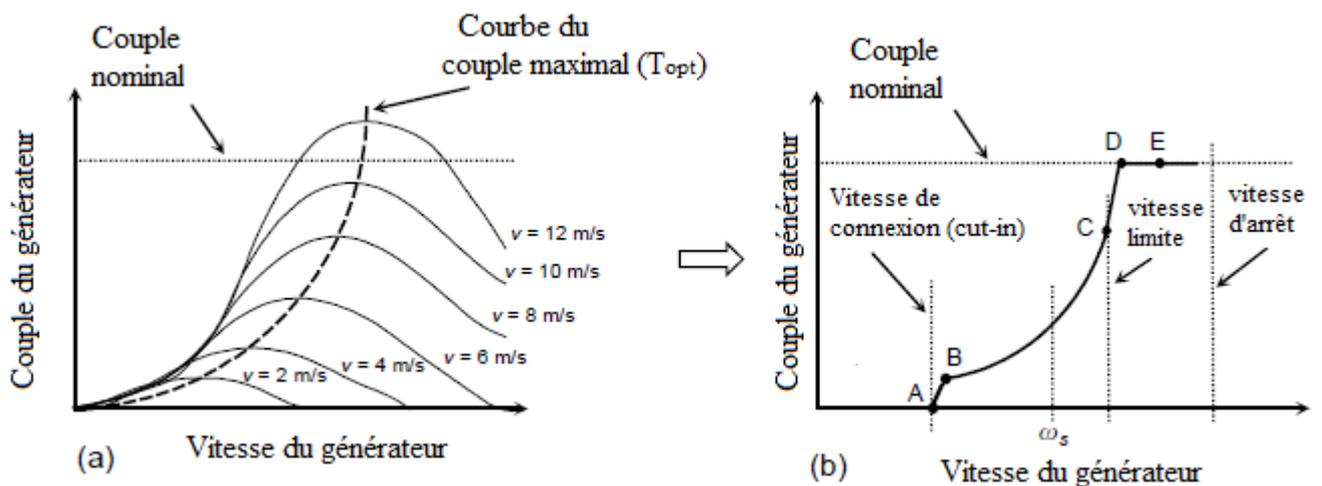
**Figure 2-28** : Boucles de régulation de tension

Dans ce schéma, la différence entre la tension de référence  $V_{sref}$ , et la tension réelle,  $V_s$ , est manipulée pour générer la référence du courant rotorique dans l'axe d,  $I_{dr\text{ref}}$ . Le courant de référence,  $I_{dr\text{ref}}$ , est comparé à la valeur réelle du courant rotorique dans l'axe d,  $I_{dr}$ , pour

générer un signal d'erreur, qui est donc traité par un régulateur standard PI. La tension de rotor requise  $v_{dr}$  est obtenue en ajoutant la sortie du régulateur PI et un terme de compensation utilisé pour éliminer le couplage entre les boucles de régulation de couple et de tension.

### MPPT - Control du couple

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire et en forme de « cloche ». Pour chaque vitesse de vent, le système doit trouver la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale.



**Figure 2-29 :** Caractéristique de la turbine éolienne pour une extraction de puissance maximale

Le schéma de la figure (2-29-a) illustre les courbes caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance (couples), vitesse de rotation de la turbine. L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés correspondant aux valeurs maximales du coefficients de puissance  $C_{p-max}$ , définit une courbe dite de puissance optimale définie par l'équation :

$$P_{opt} = \frac{1}{2} C_p^{opt}(\lambda_{opt}) \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3$$

Un fonctionnement idéal du système éolien nécessite un suivi parfait de cette courbe. Pour s'approcher de ce but, une commande spécifique connue sous la terminologie: Maximum Power Point Tracking (**MPPT**).

L'objectif du contrôleur de couple est d'optimiser l'efficacité de la capture d'énergie éolienne dans une large gamme de vitesses de vent, en gardant la puissance générée par la machine égal à la valeur optimale.

La courbe  $T_{opt}$  définit le couple optimal du dispositif (c'est-à-dire la capture d'énergie maximale), et l'objectif de contrôle est de maintenir la turbine à cette courbe pour toute variation de la vitesse du vent.

La courbe  $T_{opt}$  est définie par:

$$T_{opt} = K_{opt} \cdot \omega_r^2$$

$K_{opt}$  : Constante obtenue à partir de la conception de l'éolienne.

Deux stratégies de commande de la turbine à vitesses variables sont indiquées sur la figure 2-29 (b)

- III. Stratégie d'optimisation de puissance : Dans cette stratégie représentée par les séquences « A-B-C-D », l'énergie capturée est optimisée au dessous de la vitesse nominale du vent.
- IV. Stratégie de limitation de puissance : Le but de cette stratégie est de limiter la puissance nominale de la turbine au dessus de la vitesse nominale du vent « D-E ».

Quatre zones de fonctionnement de la turbine peuvent être distinguées sur les figures 2-29 (b)

- zone1 « A-B »: L'éolienne commence à fonctionner à la vitesse du vent de connexion  $V_{cut-in}$ , à une vitesse de rotation  $\Omega_{t-min}$ .
- zone2 « B-C » : Lorsque la vitesse de la génératrice est comprise entre les vitesses  $\Omega_{min}$  et  $\Omega_{nom}$ , un algorithme de commande est appliqué pour extraire la puissance maximale du vent. Le coefficient de puissance maximum correspond dans ce cas à un angle de calage optimal et constant.
- Zone3 « C-D » : Cette zone correspond au cas où la vitesse de rotation nominale est atteinte, tandis que la puissance générée arrive à des valeurs importantes mais inférieures à la puissance nominale.
- Zone4 « D-E » : Arrivée à la puissance nominale, un système d'orientation des pales « pitch control » est appliqué afin de limiter la puissance générée.

- Au-delà de la vitesse  $\Omega_{\text{cut-out}}$ , un dispositif de protection est actionné pour éviter des ruptures mécaniques.

On distingue deux approches possibles pour l'optimisation de la puissance éolienne :

- 1- la première approche, la moins classique , considère que la caractéristique  $C_p = f(\lambda)$  n'est pas connue.
- 2- La deuxième approche, plus répandue, suppose que la caractéristique  $C_p = f(\lambda)$  est connue. Il suffit de suivre la courbe optimale de puissance pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.

### **MPPT avec la connaissance de la courbe caractéristique de la turbine éolienne**

Cette façon de procéder exige du constructeur de l'éolienne des essais de caractérisation (soufflerie) ou des simulations du profil de pales. Une telle caractérisation permet de simplifier considérablement l'algorithme de la recherche de puissance maximale et d'utiliser des convertisseurs plus basiques et moins coûteux.

Deux familles de structures de commande sont présentées dans cette approche:

#### **a- Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse**

La nature fluctuante du vent engendre des perturbations dans le système de conversion éolien, et crée des variations continues de puissance. De cet effet, il est supposé que le couple électromagnétique développé par la machine est égal à sa valeur de référence quelque soit la puissance générée.

$$C_{em} = C_{em-ref}$$

Selon L'équation fondamentale de la dynamique permettant de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total appliqué au rotor, on peut régler cette vitesse à une référence. Ce ci est obtenu en utilisant un asservissement adéquat de vitesse pour avoir un couple électromagnétique de référence.

$$C_{em-ref} = C_{ass} \cdot (\Omega_{ref} - \Omega_{mec} )$$

$C_{ass}$  : régulateur de vitesse

$\Omega_{ref}$ : vitesse de référence

Sachant que la vitesse de rotation de la turbine est égal à :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\lambda V_v}{R}$$

La vitesse de référence de la turbine correspond à la valeur optimale de la vitesse spécifique  $\lambda_{opt}$  et le coefficient de puissance maximale  $C_{pmax}$  peut se déduire :

$$\Omega_{turbine-ref} = \frac{\lambda_{opt} V_v}{R}$$

### Conception du correcteur de vitesse

Le correcteur de vitesse constitue la partie « intelligente » de l'asservissement dans cette méthode de maximisation de puissance, et sa détermination judicieuse confère à l'asservissement de ses qualités.

Il doit accomplir les deux fonctions suivantes :

- 1- Asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.
- 2- Atténuer l'action du couple aérodynamique qui constitue une entrée perturbatrice.

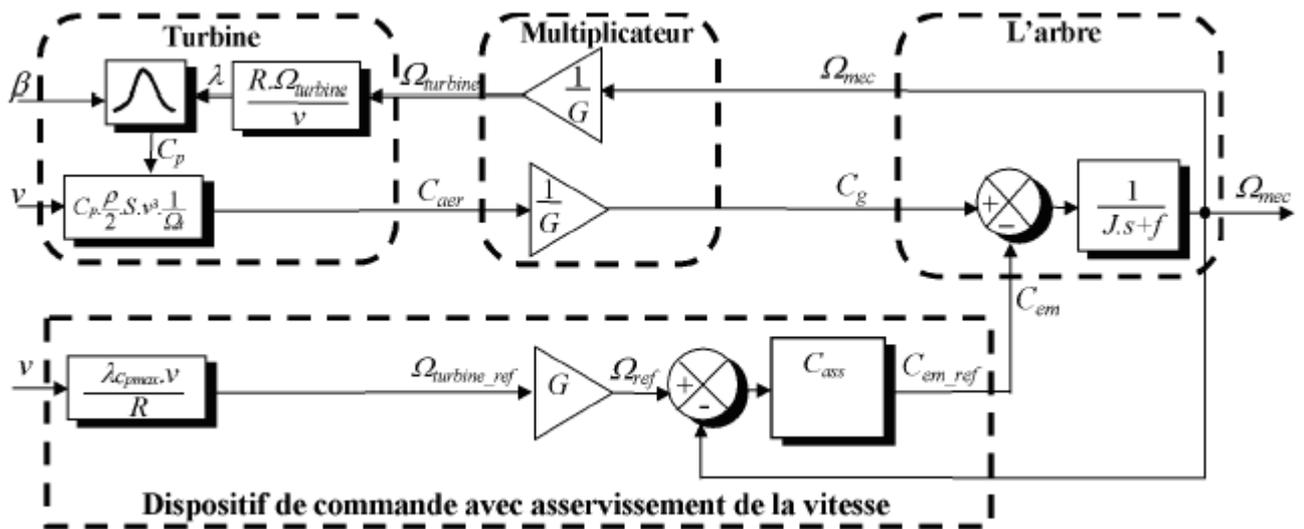


Figure 2-30 : Schéma bloc MPPT avec asservissement de vitesse

### b- Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse

Etant donné que la technique précédente de maximisation de puissance repose sur la connaissance précise de la vitesse du vent, ce qui rend le réglage de la vitesse de rotation de

la turbine relativement difficile, et dégrade les puissances captées avec des mesures erronées de cette vitesse de vent. Le recours au control des éoliennes sans asservissement de vitesse est devenu une nécessité pour la plupart des constructeurs.

Cette méthode est basée sur l'hypothèse que la vitesse du vent, et par conséquent la vitesse de rotation de la turbine varient très peu en régime permanent. Ceci , nous conduit à déduire :

- Le couple mécanique exercé sur l'arbre est considéré nul  $C_{mec} = 0$ .

- Le couple résistant dû aux frottements peut être négligé  $C_f \approx 0$ .

Le comportement dynamique de la turbine est décrit donc par l'équation statique :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f = C_g - C_{em} = 0$$

Ce qui donne:

$$C_{em} = C_g = \frac{C_{aér}}{G}$$

Le couple électromagnétique de référence est déterminé à partir d'une estimation du couple aérodynamique :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aér-est}}{G}$$

Le couple aérodynamique estimé est déterminé par l'expression :

$$C_{aer-estimé} = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine-estimé}} V_{estimé}^3$$

$\Omega_{turbine-estimé}$  : Est la vitesse estimée de la turbine, elle est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique.

$$\Omega_{turbine-estimé} = \frac{\Omega_{mec}}{G}$$

$V_{estimé}$  : est la valeur estimée de la vitesse du vent, elle peut être donné par l'expression (2-30).

$$v_{\text{estimé}} = \frac{\Omega_{\text{turbine-estimé}} \cdot R}{\lambda}$$

En utilisant les formules précédentes, on obtient une expression globale du couple électromagnétique de référence :

$$C_{\text{cem-ref}} = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\lambda^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \frac{\Omega_{\text{mec}}^2}{G^3}$$

Pour que la puissance extraite soit maximale, on associe à la grandeur  $\lambda$  sa valeur optimale  $\lambda_{\text{opt}}$  correspond au maximum du coefficient de puissance  $C_{p\text{max}}$ . La valeur du couple électromagnétique de référence est alors réglée à la valeur maximale suivante :

$$C_{\text{cem-ref}} = \frac{1}{2} \frac{C_{p\text{max}}}{\lambda_{\text{opt}}^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \frac{\Omega_{\text{mec}}^2}{G^3}$$

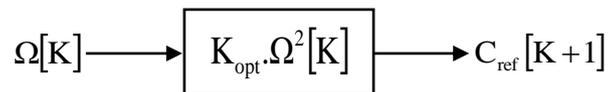
En mettant :

$$K_{\text{opt}} = \frac{1}{2} \frac{C_{p\text{max}}}{\lambda_{\text{opt}}^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \frac{1}{G^3}$$

L'expression (2-32) peut s'écrire sous la forme :

$$C_{\text{em-ref}} = K_{\text{opt}} \cdot \Omega_{\text{mec}}^2$$

L'algorithme **MPPT** contrôlé à l'aide de la vitesse de rotation mesurée dans l'étape K, détermine le couple de référence dans l'étape K+1 de la façon montrée sur la figure (2-32).



**Figure 2-31** : Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation

Une représentation graphique de ce mode de contrôle est illustrée sur la figure (2-32).

- la mesure de la vitesse  $\Omega_1$  engendre le couple de référence  $C_{ref1}$  appliqué sur l'arbre de mécanique.
- Par l'action de ce couple, la vitesse de rotation change selon l'équation fondamentale de la dynamique, pour atteindre la valeur  $\Omega_2$  et la nouvelle consigne de couple  $C_{ref2}$  sera calculée.
- Après quelques itérations, le point optimum de fonctionnement  $(\Omega_{opt}, C_{opt})$  est atteint correspondant à la puissance maximale  $P_{opt}(\lambda_{opt}, C_{popt})$ .

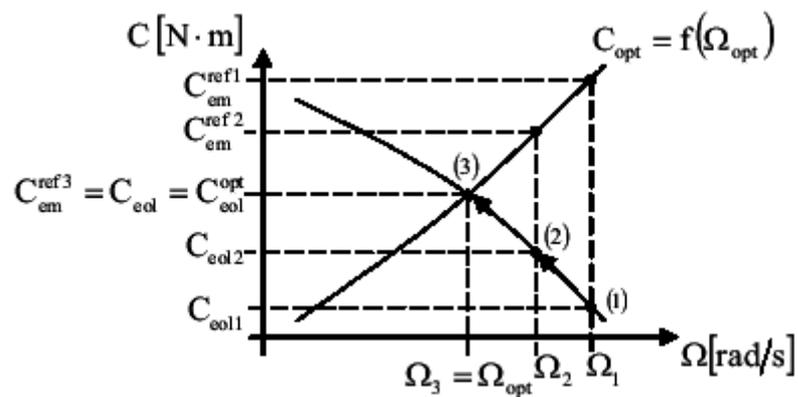
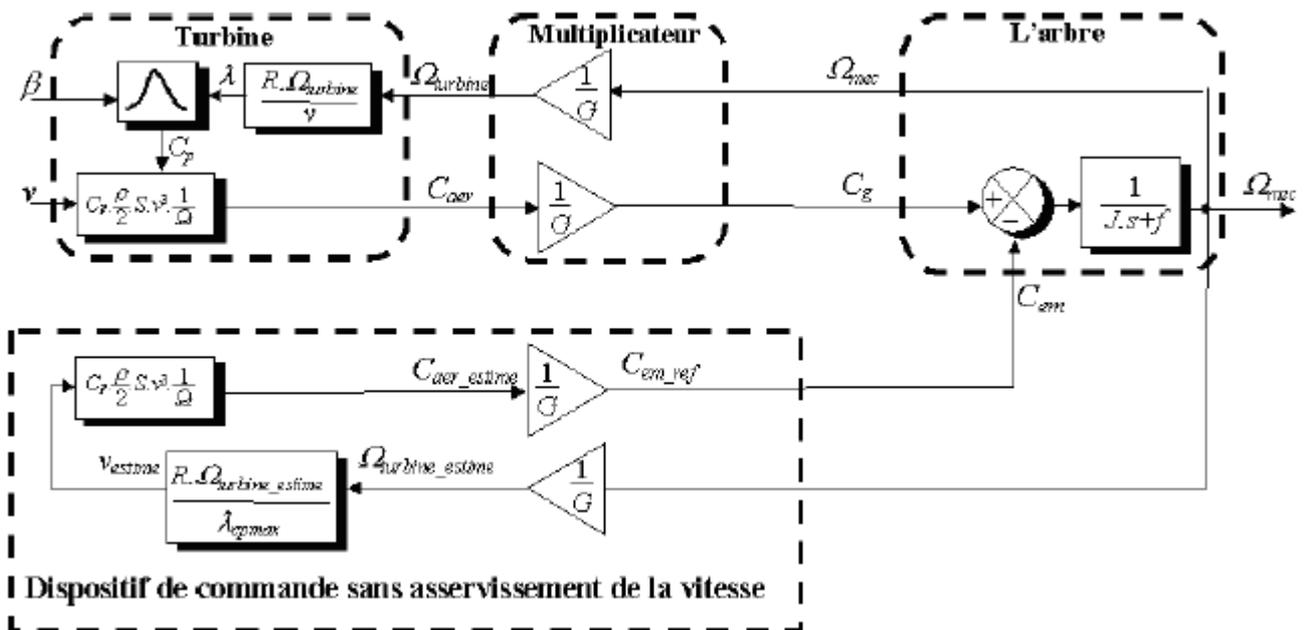


Figure 2-32 : Convergence vers le point optimal



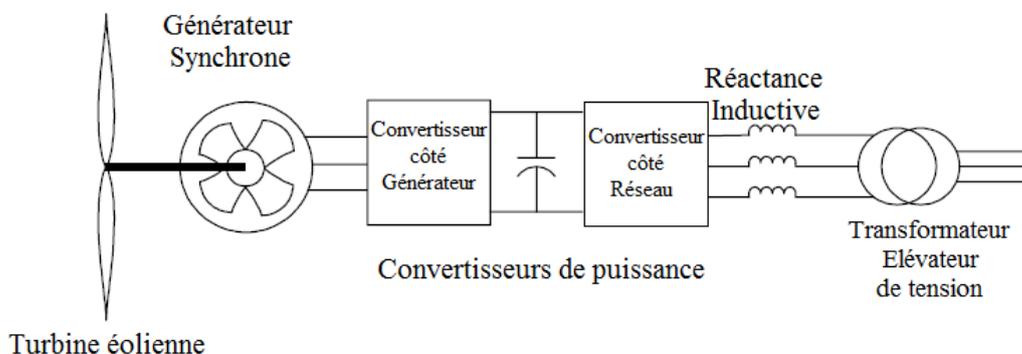
2-33: Schéma bloc MPPT sans asservissement de vitesse

## 2-Aérogénérateur Synchrones à vitesse variable

L'arbre du générateur peut être couplé directement avec la turbine en cas où le générateur est multipolaire et conçu pour fonctionner à faibles vitesses. Ce type d'éolienne est appelé éolienne à attaque direct, c'est-à-dire sans multiplicateur de vitesse. En cas où le générateur synchrone contient un nombre réduit de pôles, le couplage avec la turbine se fait par un multiplicateur de vitesse. Le générateur synchrone peut être à rotor bobiné à rotor à aimants permanents.

Pour permettre un fonctionnement à vitesse variable, le générateur synchrone est connecté au réseau par l'intermédiaire d'un système de convertisseurs de puissance à fréquence variable, qui crée un découplage complète entre la vitesse du générateur à la fréquence du réseau. Par conséquent, la fréquence électrique du générateur peut varier lorsque la vitesse du vent change, tandis que la fréquence du réseau reste inchangée.

La structure la plus utilisée de l'aérogénérateur synchrone à vitesse variable raccordé au réseau de distribution est illustré schématiquement sur la figure 2.35. Elle comprend, outre la génératrice synchrone un convertisseur MLI1, un bus continu, un onduleur MLI2, une liaison au réseau via un filtre, et un transformateur. Le convertisseur MLI1 est un redresseur triphasé à contrôle par MLI. Ce choix est justifié par le fait qu'il peut offrir un contrôle totalement réversible de la puissance instantanée. Par un autopilotage de la machine synchrone, il peut contrôler les grandeurs électromécaniques telles que le couple électromagnétique et la vitesse de la génératrice. L'onduleur à MLI2 permet de contrôler la tension du bus continu et les puissances actives et réactives échangée avec le réseau, et d'avoir des courants à fréquences adéquates.



**Figure 2-34** : Aérogénérateur synchrone, raccordé au réseau de distribution

### Générateur synchrone à aimants permanents (GSAP)

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à grand nombre de pôles qui permettent de développer des couples mécaniques considérables. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bague et balais.

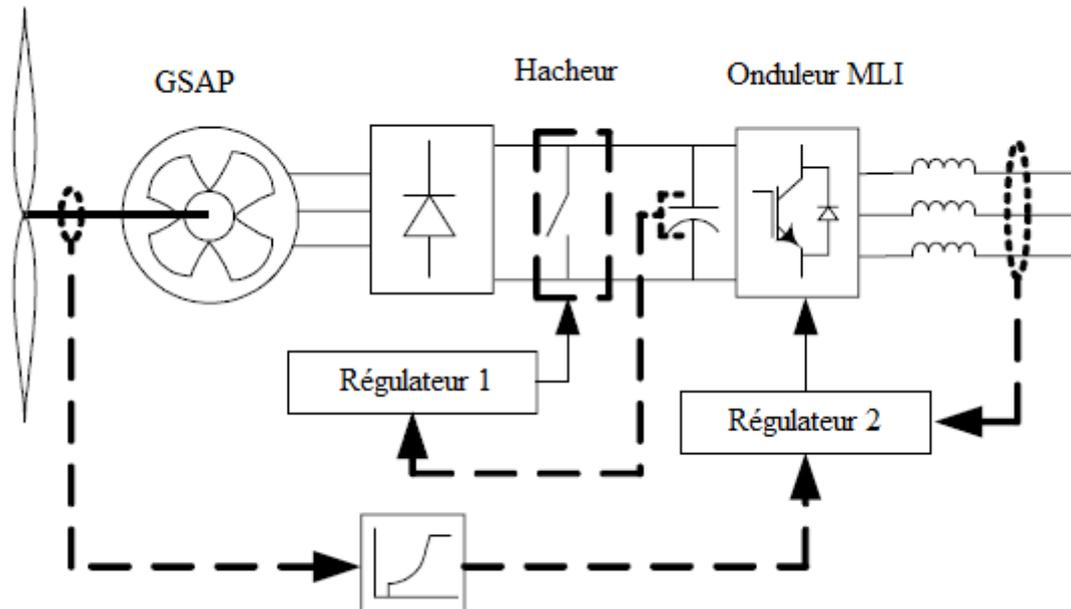


Figure 2-35 : GSAP raccordé au réseau via un hacheur et un onduleur MLI

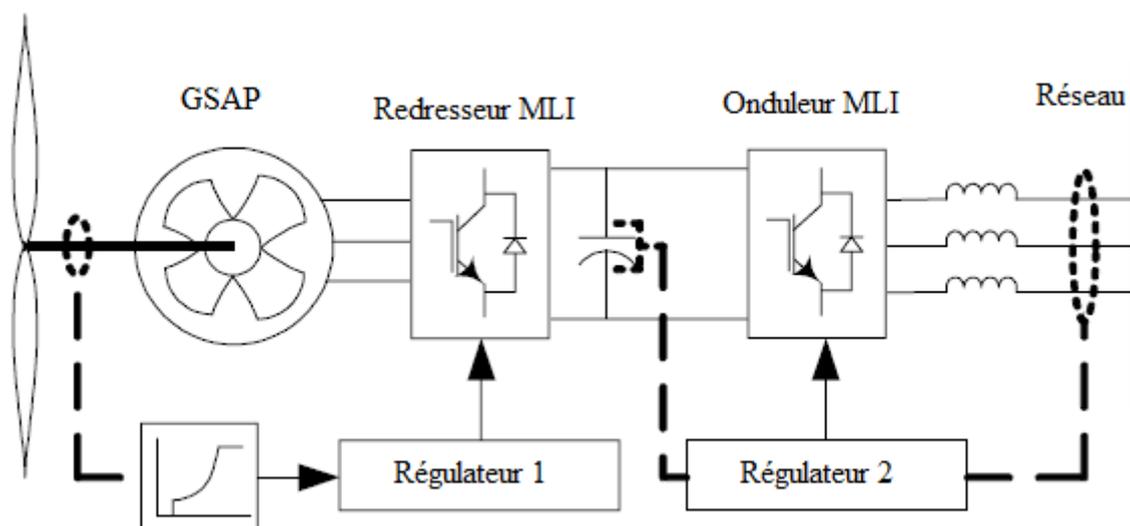


Figure 2-36 : GSAP raccordé au réseau via un redresseur MLI et un onduleur MLI

Dans la configuration de la GSAP de la figure (2-35), la génératrice est connectée à un redresseur triphasé suivi d'un hacheur, qui a pour rôle de contrôler le couple électromagnétique. La liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI qui assure la régulation de la tension du bus continu aussi bien qu'il contrôle le facteur de puissance. Cette configuration est conçue pour les petites puissances (inférieures à 50KW).

Dans la configuration de la figure (2-36), un redresseur MLI est placé entre la génératrice et le bus continu, et la liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI. L'avantage de cette configuration par rapport à la configuration précédente est l'utilisation de la commande vectorielle ce qui permet à la génératrice de fonctionner au voisinage du point optimal.

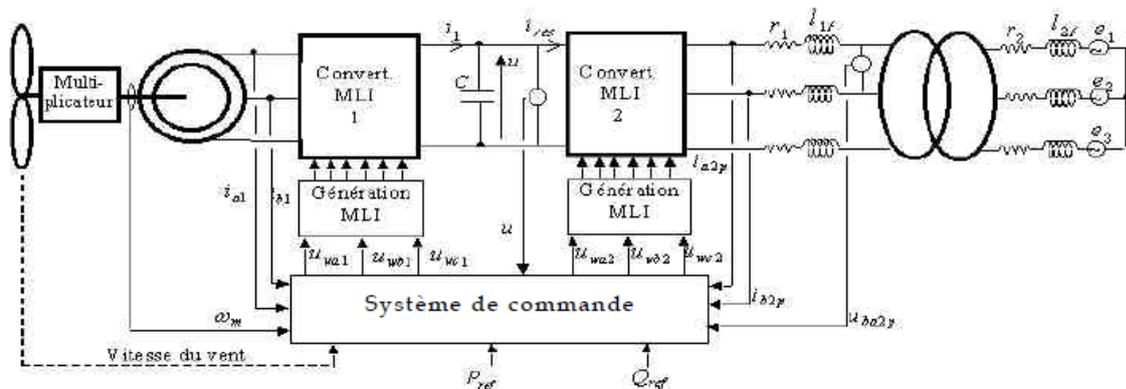


Figure 2-37 : Boucles de régulation de GSAP raccordé au réseau

### Procédures et Raccordement au réseau

Une fois l'énergie électrique produite par l'éolienne, il s'agit ensuite de la transmettre au réseau de distribution. Typiquement, pour les machines d'une puissance supérieure à 100 kW, la tension en sortie de l'éolienne est de l'ordre de quelques centaines de volts. Il est donc souvent nécessaire de disposer sur le site de production d'un transformateur élévateur de tension (transformateur de puissance) qui permette de se raccorder au réseau (10Kv ou 15Kv pour les lignes urbaines, 60Kv pour les lignes régionales).

Cependant, le raccordement au réseau doit prendre en compte certaines particularités de l'éolienne par rapport à d'autres modes de production d'énergie électrique. Il s'agit notamment de toutes les phases transitoires du fonctionnement (démarrage, arrêt, absorption des rafales,...), qui du fait de la nature fluctuante du vent peuvent survenir assez souvent.

- ❖ Pour tous types de générateurs (synchrones ou asynchrones), il est essentiel que la production d'électricité débute lorsque la machine tourne à un régime fixé.

- ❖ Le démarrage du rotor de l'éolienne peut être soit autonome, soit assisté par le générateur qui fonctionne alors en moteur, puisant son énergie dans le réseau.
- ❖ Lorsque la vitesse de rotation désirée est atteinte, la connexion de la machine au réseau doit se faire progressivement. Dans le cas contraire, il y a risque de provoquer un appel de courant sur le réseau (magnétisation du stator) suivi d'un pic de courant (début de production). Par ailleurs, si la connexion se fait brusquement, elle est vue par la machine comme une brutale action sur le frein mécanique, avec toutes les conséquences que l'on peut imaginer sur la ligne d'arbre, le multiplicateur...
- ❖ Cette connexion (et déconnexion) progressive au réseau peut se faire facilement en utilisant les convertisseurs statiques comme interfaces entre les générateur et les transformateurs de puissances.
- ❖ Lorsque la machine est en fonctionnement établi, il est généralement possible de transférer l'énergie produite par l'éolienne par un simple interrupteur, de manière à s'affranchir des pertes internes des convertisseurs statiques.
- ❖ Lors de variations trop importantes de vent, il faut déconnecter le générateur du réseau. Cela s'accompagne d'une forte variation du couple résistant de l'éolienne, et le contrôle de la vitesse de rotation des pales doit être parfaitement maîtrisé pour éviter toute survitesse (utilisation de freinage aérodynamique, mécanique).
- ❖ En cas de fluctuations répétées de vent, les opérations de déconnexion/reconnexion ne doivent pas dépasser une certaine fréquence, sous peine de provoquer des échauffements dangereux dans le générateur.

#### Recouplage après incident :

Lorsque la branche du réseau de distribution sur lequel une éolienne fournit de la puissance vient à être déconnectée de ce réseau (incident sur une ligne par exemple). La reconnexion au réseau se fera par un contrôleur électronique (synchro-coupleur) qui surveille en permanence la cohérence de phase entre le courant produit et le courant du réseau pour assurer les conditions de couplage suivantes :

- Même ordre de succession des phases.
- Mêmes valeurs efficaces de tensions.
- Mêmes fréquences.
- Tensions homologues en phases.

Sans respect de ces conditions de couplage, il y aura un risque que le courant venant de l'éolienne et le courant du réseau ne soient plus en phase. Dans ces conditions, la reconnexion

de l'éolienne peut entraîner des variations de couples très importantes, occasionnant des dommages à la transmission (multiplicateur et générateur).