

## Chapitre 4

### Modélisation et simulation du système mécanique de l'éolien

Conversion électrodynamique,

Modèle de la turbine,

Caractéristique de puissance,

Techniques d'extraction de maximum de puissance avec et sans asservissement de la vitesse,

Limitation de puissance dans la zone de survitesse (Pitch contrôle).

#### 4.1 Introduction

Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système complexe à cause de la multiplicité des domaines existants, à savoir, le domaine aérodynamique, mécanique, et électrique. Et les facteurs déterminant la puissance mécanique, comme la vitesse du vent, la dimension, et la forme de la turbine.

Un modèle dynamique rassemblant tous ces paramètres est nécessaire pour comprendre le comportement de la turbine, et le recours à la modélisation est devenu une nécessité pour contrôler ces performances et satisfaire les caractéristiques opérationnelles voulues.

Le système mécanique de l'éolienne est composé de quatre organes et peut être représenté comme illustré sur la figure (4-1).

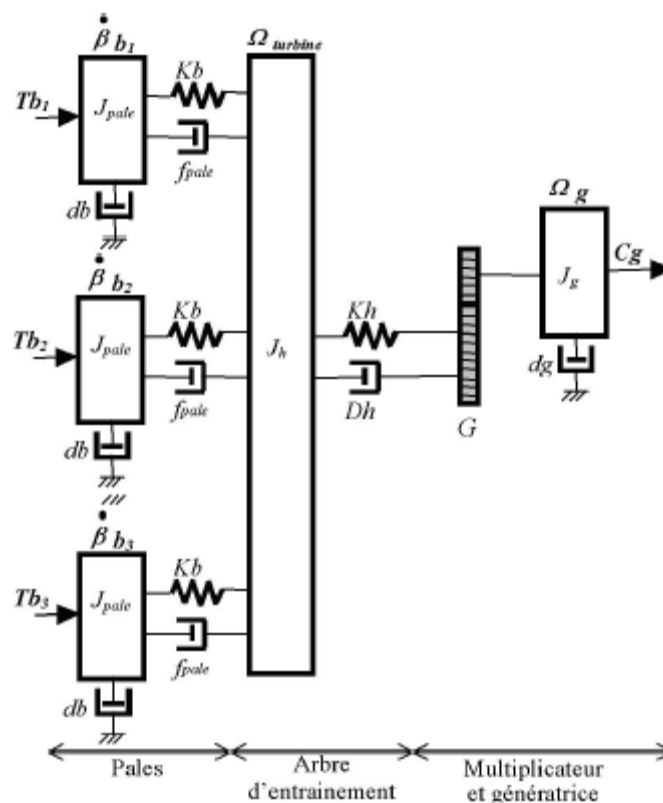


Figure 4-1 : Représentation du système éolien

- 1- Trois pales considérées de conception identique et ayant les mêmes paramètres à savoir l'inertie  $J_{pale}$ , élasticité  $K_b$ , et coefficient de frottement  $db$ . Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support  $f_{pale}$ . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées  $\dot{\beta} b_1, \dot{\beta} b_2, \dot{\beta} b_3$ . Chaque pale reçoit une force  $Tb_1, Tb_2, Tb_3$  qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée.
- 2- L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :
  - son inertie  $J_h$
  - son élasticité  $K_h$
  - son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur  $D_h$
- 3- le multiplicateur de vitesse, de gain  $G$ .
- 4- Le rotor de la génératrice possède :
  - une inertie  $J_g$
  - un coefficient de frottement  $d_g$

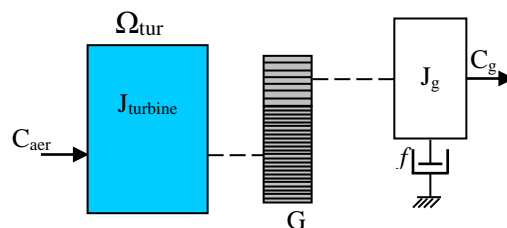
Ce rotor transmet un couple  $C_g$  à la génératrice électrique et tourne à une vitesse  $\Omega_{mec}$ .

#### 4.2 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes:

- La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques.
- Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air ( $db$ ) est très faible et peut être ignoré.
- Les pertes par frottement du rotor turbine sont considérées négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté génératrice.

On peut ainsi aboutir à un modèle mécanique plus simple (figure 4.2).



**Figure 4-2 :** Modèle simplifié de la turbine éolienne

Le système étudié est composé d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur  $R$  entraînant une génératrice à travers un réducteur de vitesse de gain  $G$ . (Figure 4-3).

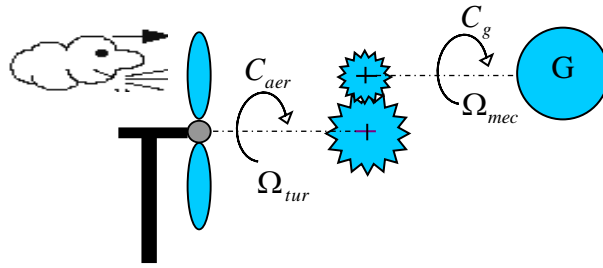


Figure 4-3 : synoptique du montage éolien étudié

### 4.3 Modèle de la turbine

Les variables d'entrée et sortie de la turbine éolienne peuvent se résumer comme suit :

- 1- La vitesse du vent qui détermine l'énergie primaire à l'admission de la turbine.
- 2- Les quantités spécifiques de la machine, résultantes particulièrement de la géométrie du rotor et la surface balayée par les pales de la turbine.
- 3- La vitesse de la turbine, l'inclinaison des pales, et l'angle de calage.

Les quantités de sortie de la turbine sont la puissance ou le couple qui peuvent être contrôlées en variant les quantités d'entrée précédentes.

### 4.4 Modèle du multiplicateur

Le rôle du multiplicateur est de transformer la vitesse mécanique de la turbine en vitesse de la génératrice, et le couple aérodynamique en couple du multiplicateur selon les formules mathématiques suivantes :

$$G = \frac{C_{aer}}{C_g} \quad (4-1)$$

$$G = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_{tur}} \quad (4-2)$$

### 4.5 Equation dynamique de l'arbre de transmission

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total ( $C_{mec}$ ) appliqué au rotor :

$$J \cdot \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (4-3)$$

$J$  : l'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice, comprenant l'inertie de la turbine, de la génératrice, des deux arbres, et du multiplicateur.

$f$  : le coefficient de frottement total du couplage mécanique.

Le couple mécanique déduit de cette représentation simplifiée est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \tag{4-4}$$

$C_{em}$ : Le couple électromagnétique développé par la génératrice.

$C_g$ : Le couple issu du multiplicateur.

$C_f$ : Le couple résistant dû aux frottements.

$$C_f = f . \Omega_{mec} \tag{4-5}$$

Les variables d'entrée de l'arbre de transmission sont donc: le couple issu du multiplicateur  $C_g$  et le couple électromagnétique  $C_{em}$ .

L'organigramme de simulation de la turbine peut se représenter comme suit :

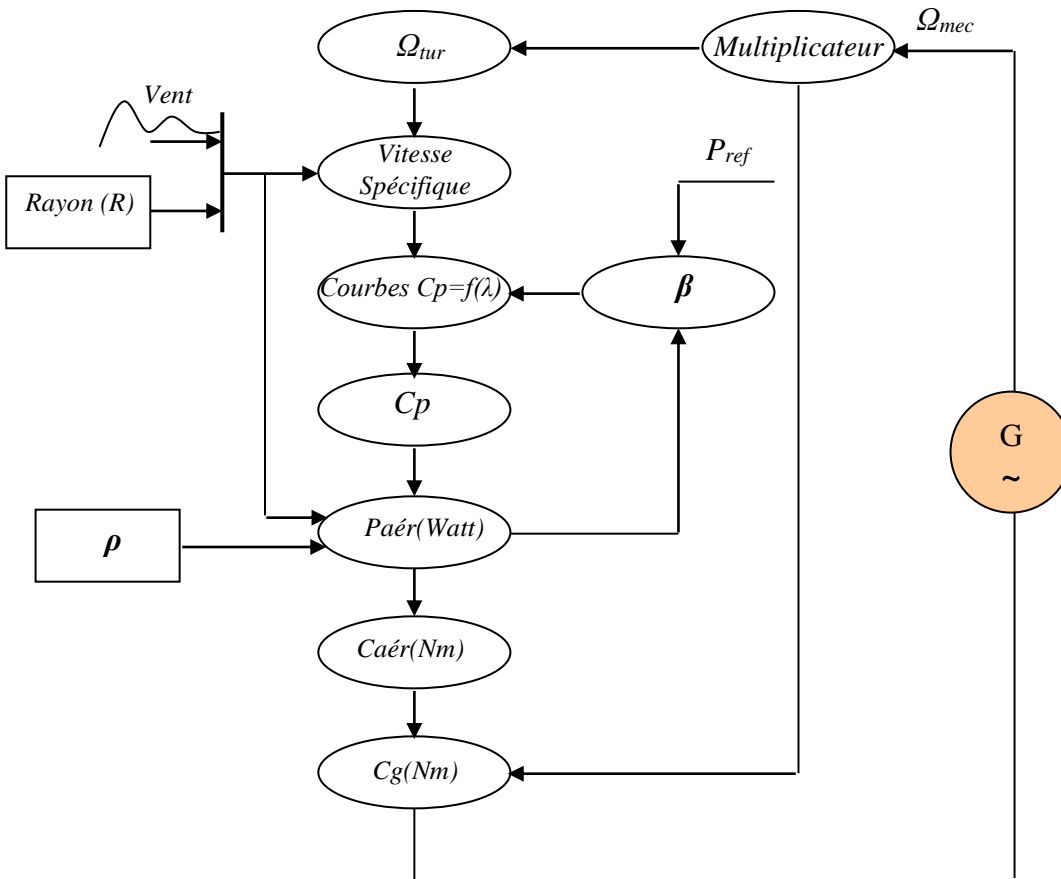


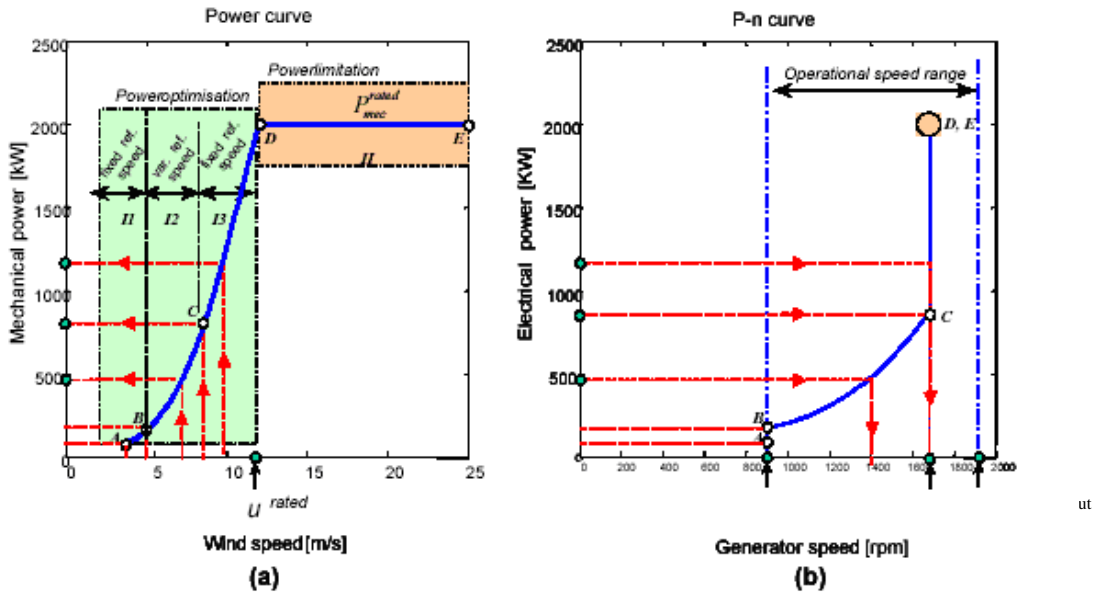
Figure 4-4 : organigramme de simulation de la turbine éolienne

#### 4.6 Stratégies de commande de la turbine éolienne

Les stratégies de commande des systèmes de génération éoliens de moyenne et grande puissance à vitesses variables et à régulation de puissance « pitch » utilisées notamment pour les

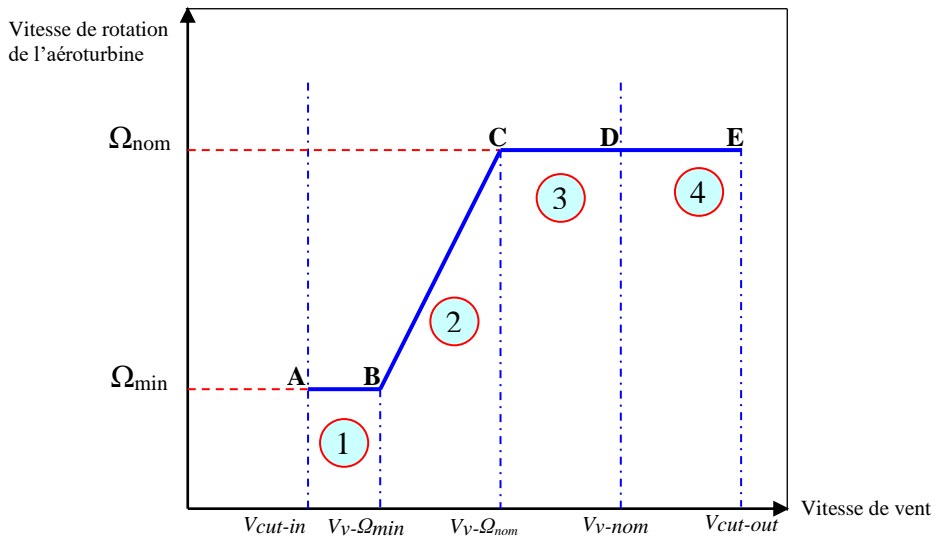
aérogénérateurs Vestas et Gamesa de dernière génération sont basées sur les deux courbes illustrées sur la figure 4-5, qui sont déduites des données aérodynamiques de la turbine.

- (a) Puissance mécanique en fonction de la vitesse du vent.
- (b) Puissance électrique en fonction de la vitesse de rotation de la turbine.



**Figure 4-5:** caractéristiques puissance, vitesse du vent et vitesse de rotation [30]  
 (a) puissance mécanique en fonction de la vitesse du vent  
 (b) puissance électrique en fonction de la vitesse de rotation

La figure (4-6) représente une autre caractéristique de la turbine éolienne, qui est la vitesse de rotation de l'aérogénérateur en fonction de la variation de vitesse de vent .



**Figure 4-6 :** Caractéristiques vitesse de rotation, vitesse de vent

Deux stratégies de commande de la turbine à vitesses variables sont indiquées sur la figure (4-6)

- 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.

#### 4.7 Système de contrôle de l'aéroturbine

Le contrôle de l'aéroturbine est assuré par deux boucles de régulation, fortement liées :

1. Boucle de régulation de vitesse.
2. Boucle de régulation de puissance.

La première boucle est la boucle principale dans la stratégie d'optimisation de la puissance où la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique. Dans la stratégie de limitation de puissance, les deux boucles de régulation interviennent.

Quand la vitesse de vent est inférieure à la vitesse nominale, l'angle de calage est maintenu constant à une valeur optimale  $\beta_{opt}$ , tandis que la vitesse de rotation est ajustée par la boucle de régulation de vitesse pour extraire le maximum de la puissance du vent. Lors d'une rafale de vent, la vitesse de rotation va augmenter et peut dépasser la vitesse nominale à cause de la lenteur du système d'orientation des pales qui a une dynamique plus lente que celle de la machine . Dans ce cas, la boucle de vitesse réagit en augmentant la puissance de référence de la génératrice, et anticipe l'action du dispositif d'orientation des pales en réglant le couple électromagnétique de manière à contrôler la vitesse de rotation dans la zone 3 .

#### 4.8 Méthodes de recherche du point maximum de puissance

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.

Le schéma de la figure (4-7) illustre les courbes caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation de la turbine. Chaque courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse de vent  $V_v$  donnée.

L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale définie par l'équation :

$$P_{opt} = \frac{1}{2} C_p^{opt}(\lambda_{opt}) \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (4-6)$$

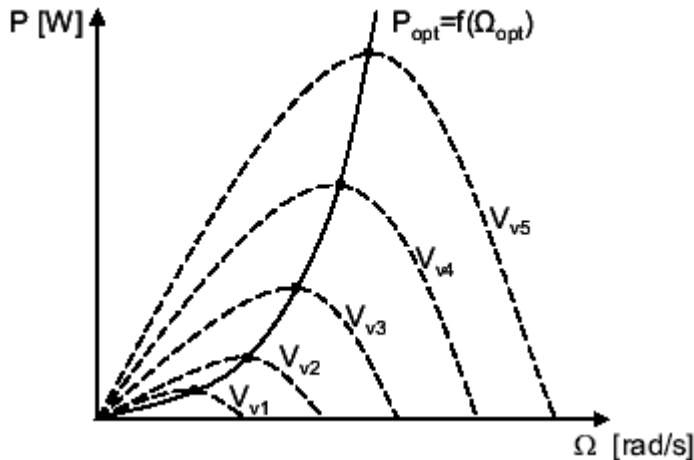


Figure 4-7 : caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation

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) correspond à la zone 2 doit être utilisée. La stratégie de cette commande consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. On distingue deux approches possibles :

- 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.

#### 4.8.1 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:

##### 4.8.1.1 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.

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad (4-7)$$

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.

$$C_{em-ref} = C_{ass} \cdot (\Omega_{ref} - \Omega_{mec} ) \quad (4-8)$$

$C_{ass}$  : régulateur de vitesse

$\Omega_{ref}$  : vitesse de référence

Selon l'équation (2-7), la vitesse de rotation de la turbine est égal à :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\lambda V_v}{R} \quad (4-9)$$

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 de (4-9) :

$$\Omega_{turbine-ref} = \frac{\lambda_{opt} V_v}{R} \quad (4-10)$$

##### 4.8.1.2 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:

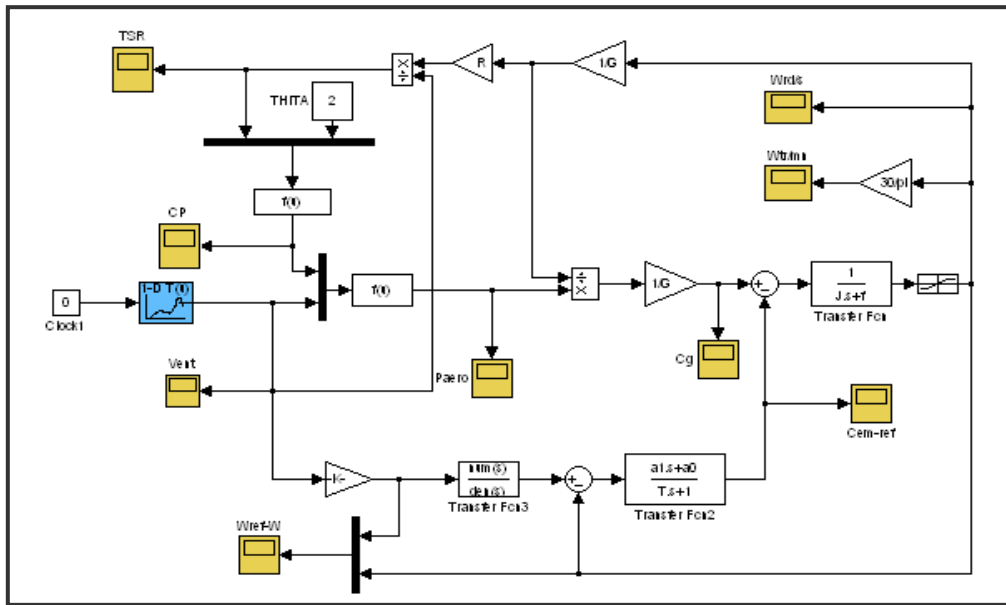
- 1- Asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.



2- Atténuer l'action du couple aérodynamique qui constitue une entrée perturbatrice.

Deux correcteurs ont été utilisés dans le développement du modèle, un correcteur Proportionnel Intégral (PI) avec anticipation, et un correcteur Proportionnel Intégral à avance de phase (Annexe A).

Le schéma bloc du modèle de la turbine est représenté sur la figure (4-8).



**Figure 4-8** : Schéma bloc de la maximisation de puissance avec asservissement de vitesse, « A avance de phase »

#### 4.8.1.3 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. Ce-ci, 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 :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f = C_g - C_{em} = 0 \quad (4-11)$$

L'équation (2-25) donne :

$$C_{em} = C_g = \frac{C_{aér}}{G} \quad (4-12)$$

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

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aer-est}}{G} \quad (4-13)$$

Le couple aérodynamique estimé est déterminé par l'expression :

$$C_{aer-estimé} = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine-estimé}} V_{estimé}^3 \quad (4-14)$$

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

$$\Omega_{turbine-estimé} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (4-15)$$

$V_{estimé}$  : est la valeur estimée de la vitesse du vent, elle peut être donné par l'expression :

$$v_{estimé} = \frac{\Omega_{turbine-estimé} \cdot R}{\lambda} \quad (4-16)$$

En utilisant les formules du (4-14), au (4-16), on obtient une expression globale du couple électromagnétique de référence :

$$C_{cem-ref} = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\lambda^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \frac{\Omega_{mec}^2}{G^2} \quad (4-17)$$

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

$$C_{cem-ref} = \frac{1}{2} \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \frac{\Omega_{mec}^2}{G^2} \quad (4-18)$$

En mettant :

$$K_{opt} = \frac{1}{2} \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \frac{1}{G^2} \quad (4-19)$$

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

$$C_{em-ref} = K_{opt} \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (4-20)$$

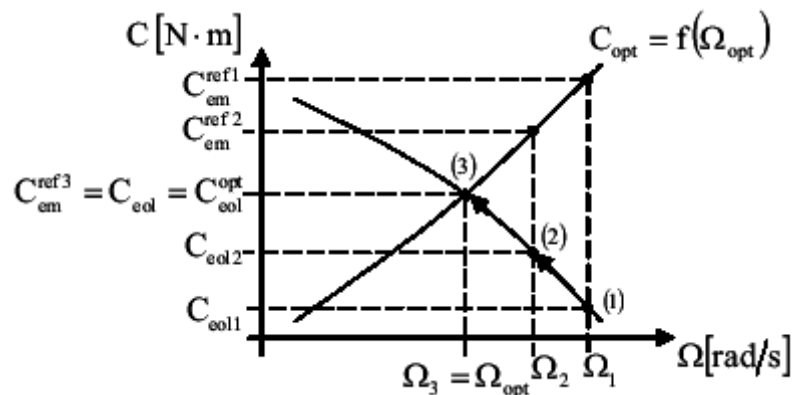
L'algorithme **MPPT** contrôlé à l'aide de la vitesse de rotation mesurée dans l'étape K, détermine le couple de référence dans l'étape K+1 de la façon montrée sur la figure (4-9).

$$\Omega[K] \longrightarrow \boxed{K_{opt} \cdot \Omega^2 [K]} \longrightarrow C_{ref} [K+1]$$

**Figure 4-9 :** Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation

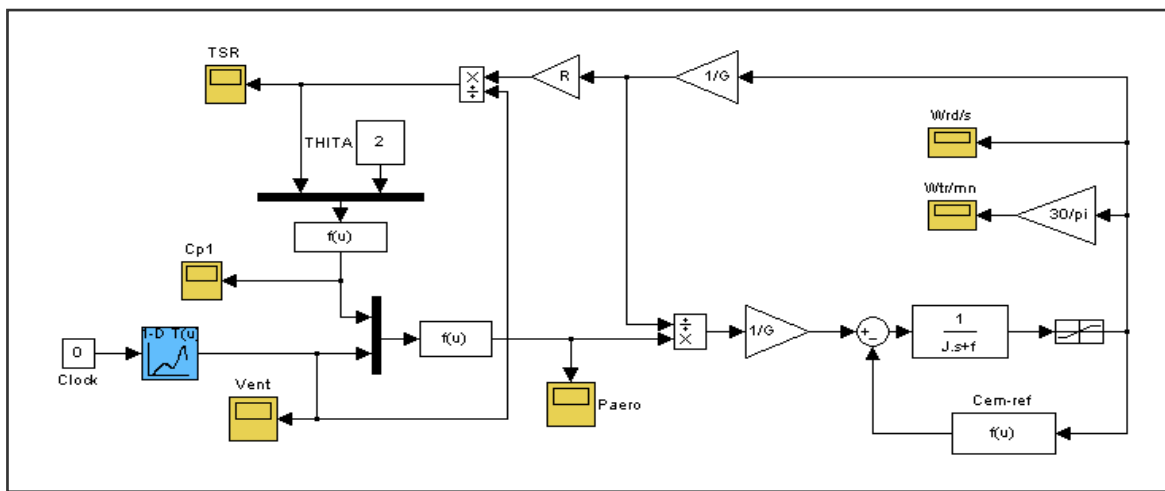
Une représentation graphique de ce mode de contrôle est illustrée sur la figure (4-10).

- 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 4-10 :** Convergence vers le point optimal

Le schéma bloc du modèle de la turbine est représenté comme suit :



**Figure 4-11 :** Schéma bloc de la maximisation de puissance sans asservissement de vitesse