

II-1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est établir un modèle mathématique qui permettra de simuler le comportement de l'éolienne dans un cadre de fonctionnement bien défini.

Un système physique est un ensemble de sous-systèmes ce qui permet de s'intéresser à chaque partie séparément afin de simplifier l'étude avant de faire une synthèse de toutes les parties constituant le système global. Ce pour cette raison que nous allons dans cette partie, commencer par modéliser le vent, puis nous allons nous intéresser à la modélisation de la turbine choisie.

II-2 Modélisation du vent (source primaire)

Le vent et la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. La modélisation du vent est primordiale que ce soit pour :

- définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne
- définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales
- développer et affiner la modélisation du rotor
- évaluer le potentiel d'énergie utilisable
- fournir une aide pour l'implantation des machines

La définition du modèle de vent nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de l'an concernée par l'étude. Le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui présente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques. Il est donné par l'équation (II.1) [27].

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

Avec

A : la valeur moyenne de la vitesse du vent

a_n : Amplitude de l'harmonique de l'ordre n

$b_n \cdot w_v$: Pulsation de l'harmonique de l'ordre n

i : le range de dernier harmonique retenue dans le calcul du profile du vent

Dans cette étude, nous avons représenté l'évolution de la vitesse du vent de façon déterministe, par une somme de plusieurs harmoniques, conformément à [5],[28].

$$v_v(t) = 6 + 0.2 \sin(0.1047t) + 2 \sin(0.665t) + \sin(1.2930t) + 0.2 \sin(3.6645t)$$

II-2-1 Résultat de simulation du vent

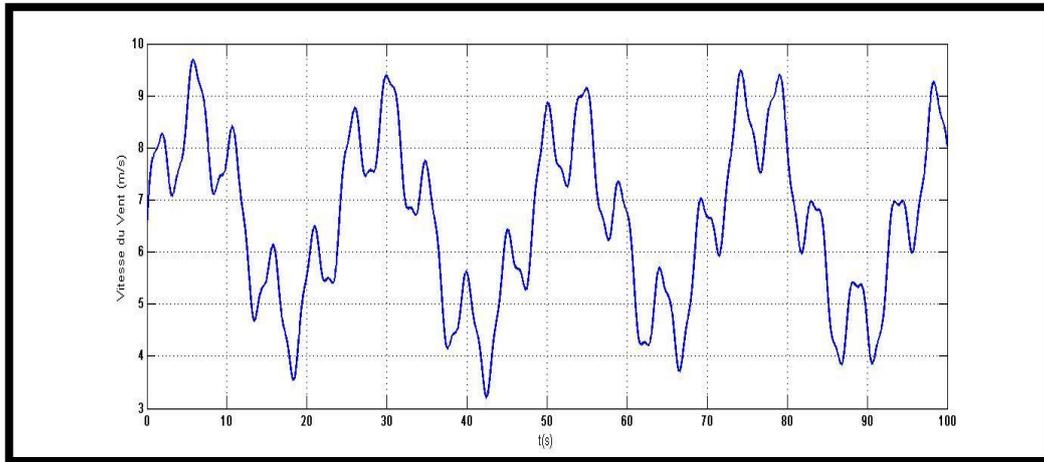


Figure II 1 : Evolution de la vitesse du vent dans le temps (m/s) « profil du vent réel ».

II-3 Modélisation de la turbine

Considérons une turbine éolienne à trois pales orientables, fixées sur un l'arbre de la turbine formant ainsi un bloc mécanique capable de tourner grâce à l'énergie du vent. Ceci permet de déduire que chaque partie de cet ensemble subit trois contraintes à savoir sa propre inertie, le frottement et la contrainte élastique. D'une manière générale l'arbre de la turbine est solidaire d'un multiplicateur de vitesse, qui, à son tour et lié à l'arbre de la génératrice. La figure II.2 illustre d'une manière détaillée le schéma équivalent de la turbine éolienne[29],[30].

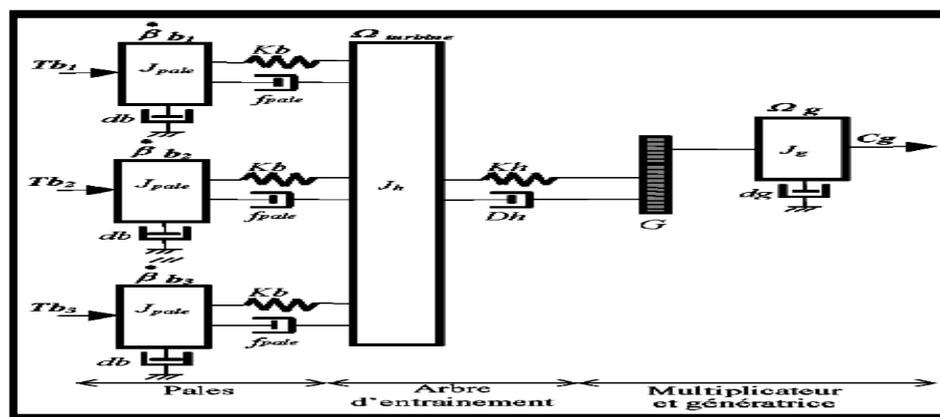


Figure II 2 : Schéma mécanique équivalent de la turbine éolienne

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

- La même inertie J_{pale}
- La même élasticité k_b

- Le même coefficient de frottement par rapport à l'air db .

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

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

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

Le rotor de le moteur possède :

- Une inertie
- Un coefficient de frottement

Ce rotor transmet un couple entraînant au moteur électrique et tourne à une vitesse notée Ω_{mec} .

Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toute les forces de poussée ($Tb_1 = Tb_2 = Tb_3$) alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De par la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air (db) est très faible et peut être ignoré. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice[31],[18]

On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (Figure II-3).

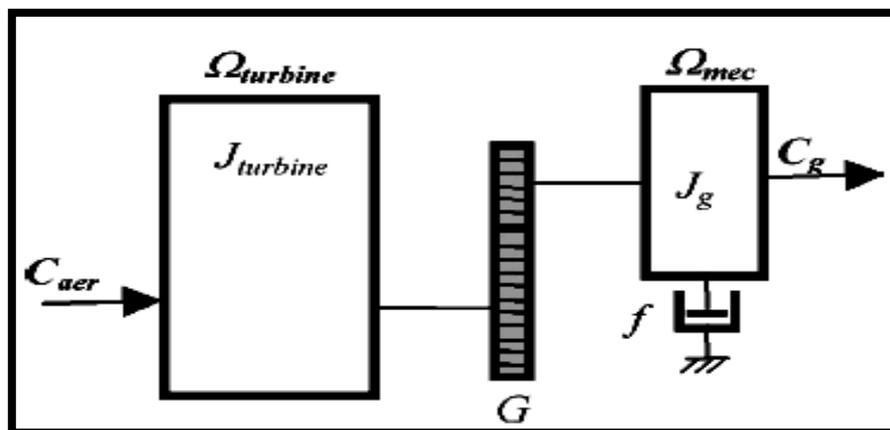


Figure II 3 : Schéma mécanique équivalent simplifié de la turbine éolienne

II-3-1 Modélisation de la turbine à étudier

La turbine que nous allons étudier est une éolienne de 7.5KW. C'est un modèle tripale à axe horizontal dont la longueur d'une pale est de 3m et le rapport du multiplicateur de vitesse de gain $G=5.4$.

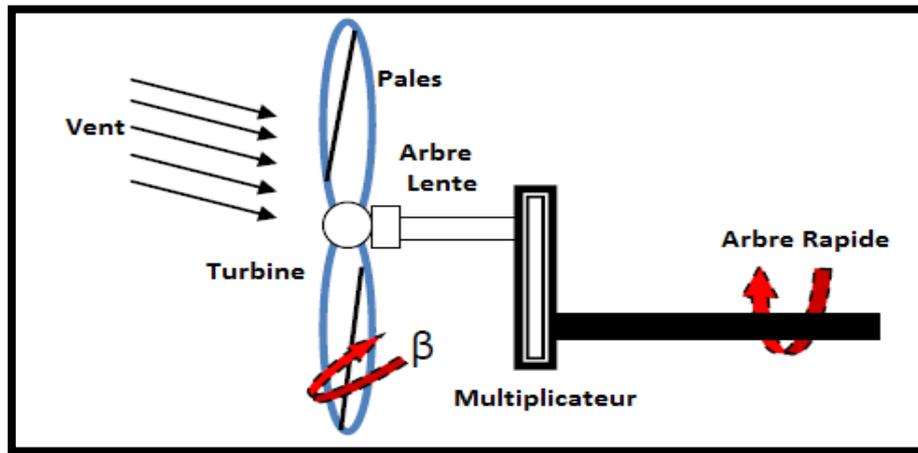


Figure II 4 : Turbine éolienne

II-3-2 Loi de BETZ

$$m = \frac{\rho \cdot s(V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II.2})$$

De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini :

$$C_p = \frac{P_{max}}{P_v} = 0.59 \quad (\text{II.3})$$

La formule de BETZ montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas du 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde[32].

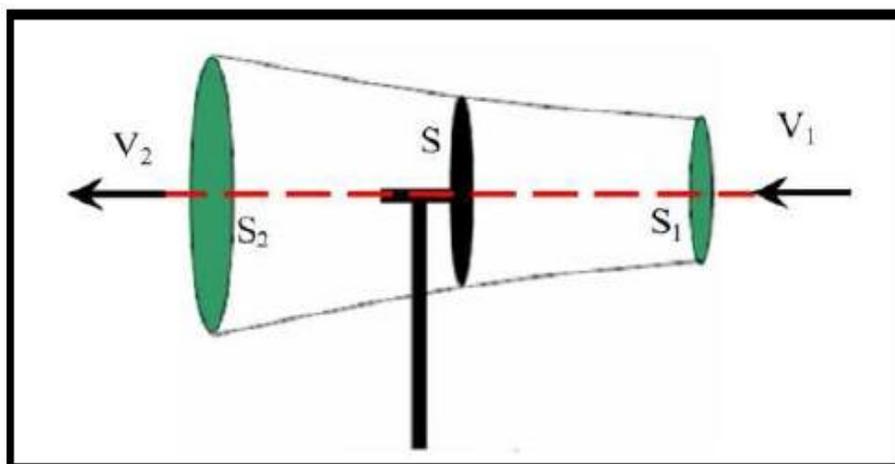


Figure II 5 : Principe de théorie de loi de BETZ.

II-3-2-1 Modèle de pales

On retrouve dans la littérature plusieurs types de modélisation du coefficient de puissance, souvent tous limités par les données d'entrée, donc généralement valables pour une turbine particulière : chaque turbine à un comportement spécifique[3].

La puissance cinétique du vent est donnée par :

$$P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (\text{II.4})$$

La turbine permet de convertir l'énergie aérodynamique du vent en énergie mécanique. Son couple aérodynamique C_{aero} donné par l'expression suivante[12].:

$$C_{aero} = \frac{1}{2\Omega t} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (\text{II.5})$$

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse de la turbine et la vitesse du vent (λ), son expression est donnée comme suit :

$$P_{aéro} = C_p(\lambda, \beta) P_v = \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{II.6})$$

Pour une éolienne de 10Kw, l'expression du coefficient de puissance est donnée par[33]:

$$C_p = f(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) \cdot \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda_i}\right) + C_6 \cdot \lambda \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (\text{II.8})$$

Les six coefficients définis, $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ dépendent de la turbine considérée sont présenté dans le tableau suivants [16]:

$$C_1 = 0.5176 \quad C_2 = 116 \quad C_3 = 0.4 \quad C_4 = 5 \quad C_5 = 21 \quad C_6 = 0.0068$$

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par :

$$C_{aéro} = \frac{P_{aéro}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (\text{II.9})$$

Le coefficient de puissance C_p qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine. Il dépend des caractéristiques de la turbine (les dimensions de la pale, le ratio de la vitesse λ et l'angle d'orientation de pale β).

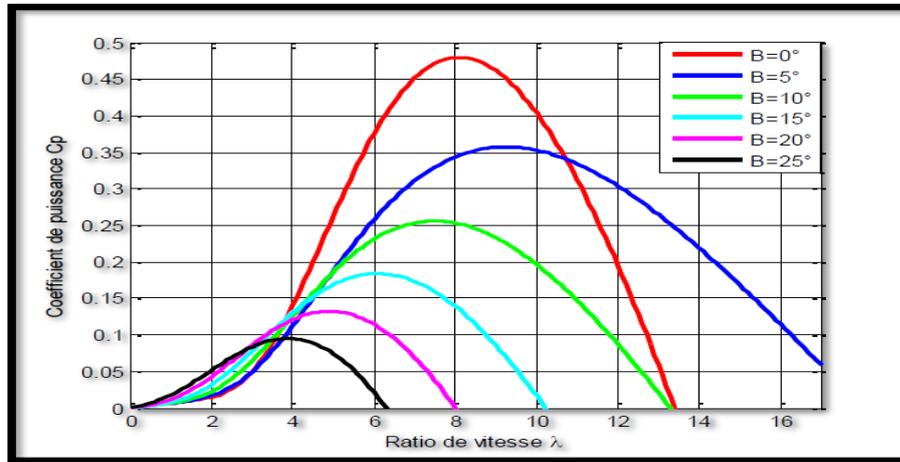


Figure II 6 : Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse et l'angle d'orientation de pales.

A l'aide de la Figure (II.6), nous pouvons remarquer que l'augmentation de l'angle d'orientation de pales permet de diminuer le coefficient C_p . Le point optimale est défini par : ($\beta = 0$; $C_{p-max} = 0.48$; $\lambda = 8.1$), c'est le point correspondant au maximum du coefficient de puissance (C_{p-max}) et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée.

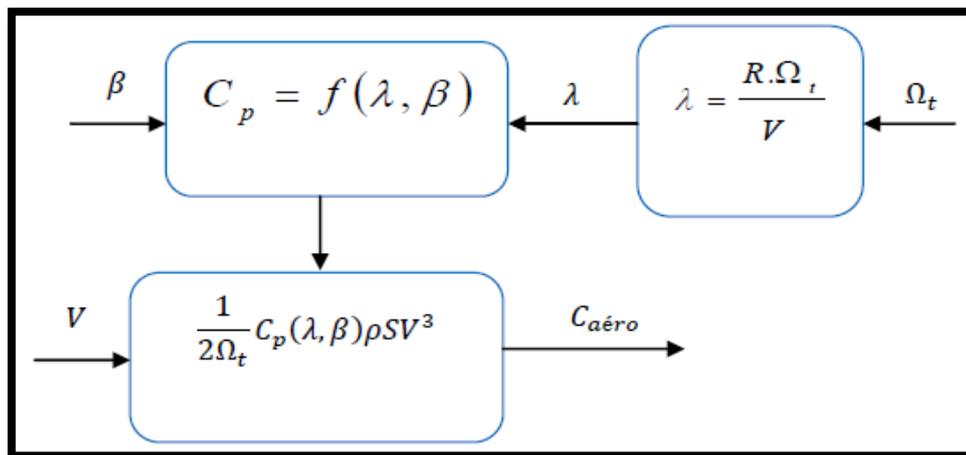


Figure II 7 : Schéma bloc du modèle des pales

II-3-3 Modèle du Multiplicateur

Le multiplicateur de vitesse, qui est disposé entre la turbine éolienne et la génératrice, a pour but est de transformer la vitesse mécanique de la turbine en vitesse de la génératrice, et le couple aérodynamique en couple du multiplicateur.

Le multiplicateur utilisé est constitué deux arbres tournants, un arbre lente tournée à une vitesse $\Omega(t)$ et un arbre rapide tournée avec une vitesse $\Omega(mec)$ figure (II.9).

$$\Omega_t = \frac{1}{G} \Omega_{mec} \quad (II.10)$$

$$C_g = \frac{1}{G} C_{aero} \quad (II.11)$$

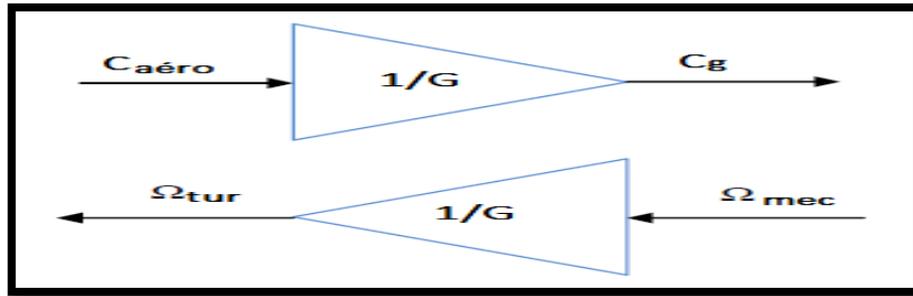


Figure II 8 : Schéma block du modèle du multiplicateur de vitesse

II-3-4 Modèle de l'arbre

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice est donnée par [17]

$$j \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_T - f\Omega_{mec} \quad (II.12)$$

Nous pouvons établir le modèle de la turbine est donné sur la figure (II.9)

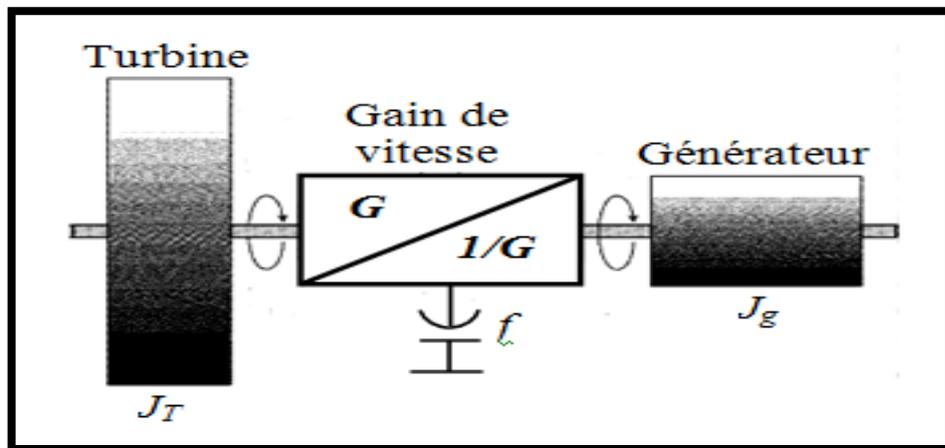


Figure II 9 : Modèle de l'arbre mécanique

Le schéma bloc représentant le modèle de l'ensemble de la chaîne cinématique de la turbine est obtenu en regroupant les composantes respectives développées précédemment

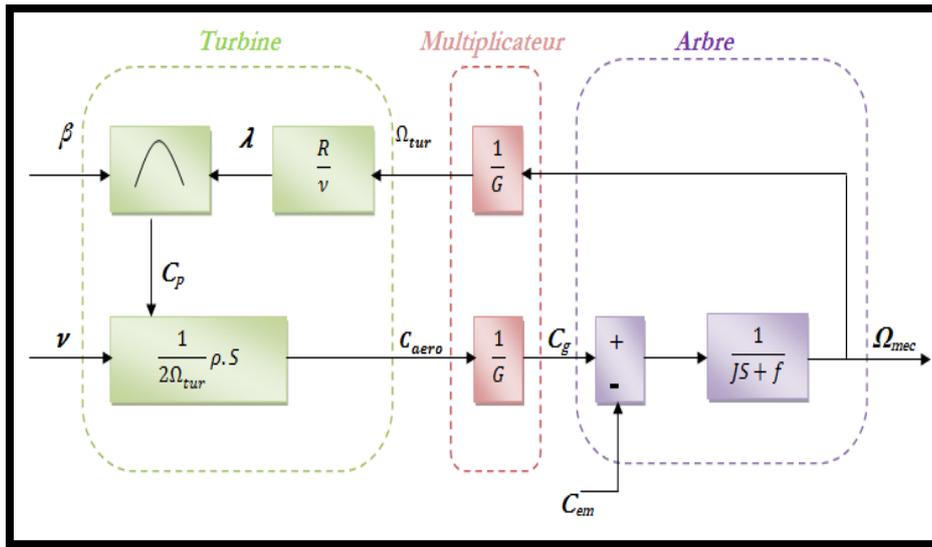


Figure II 10 : Schéma bloc du modèle de la turbine

II-3-5 Bloc de simulation de la turbine éolienne

L'ensemble des modèles de la turbine (pales, multiplicateur de vitesse et arbre mécanique) ont été simulés sous un logiciel MATLAB/Simulink en conservant l'architecture réelle

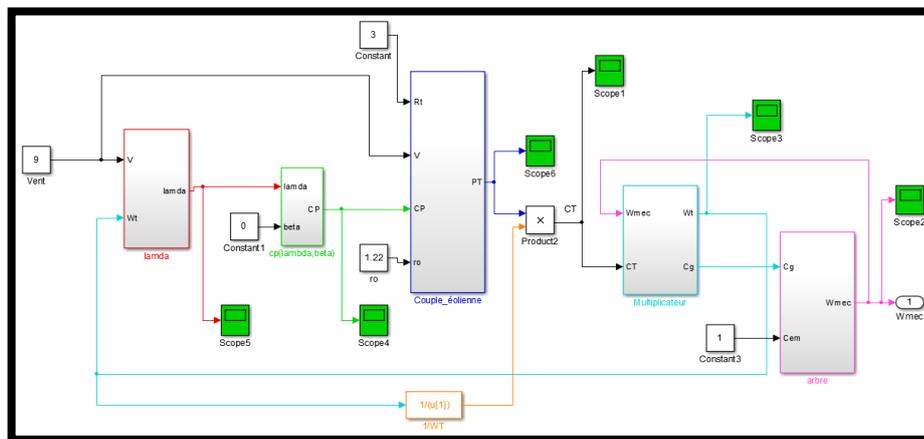


Figure II 11 : Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne.

II.3.6 Résultats de simulation de la turbine

Les Figure II-12-13 présente l'évolution des grandeurs mécanique de la turbine en boucle ouverte et pour une vitesse moyenne du vent égale à 9 m/s.

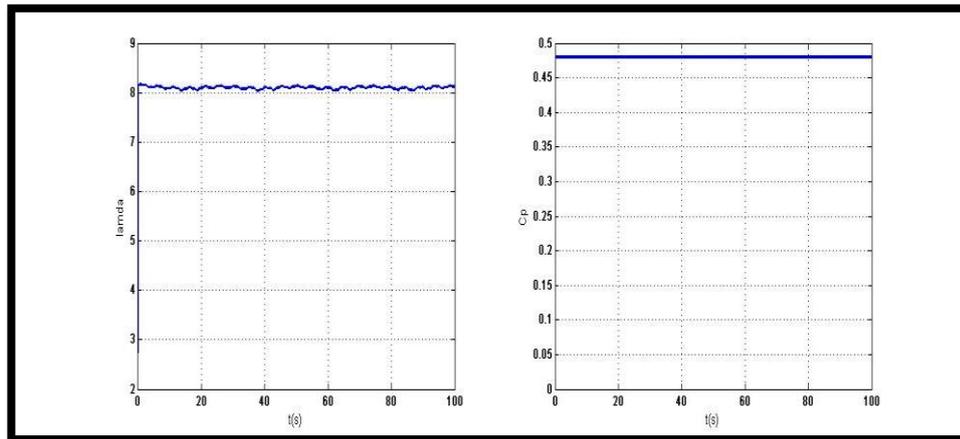
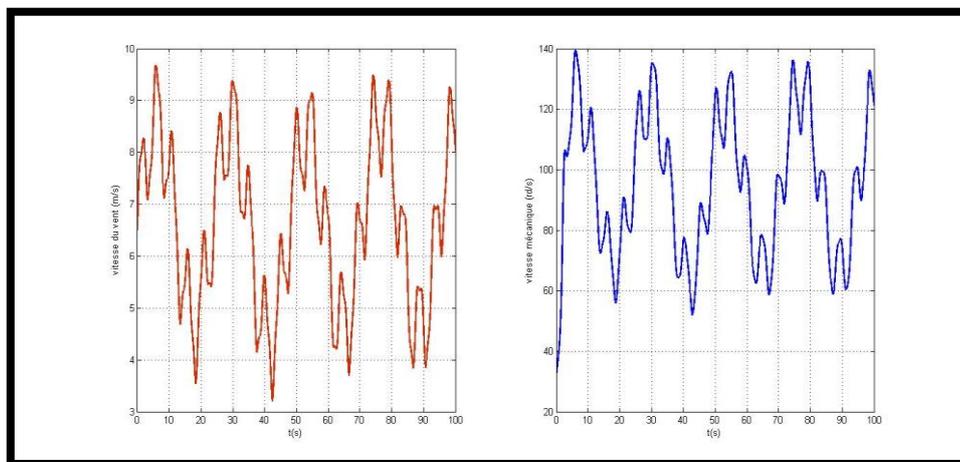
Figure II 12 : Allure de coefficient de puissance C_p et λ de la turbine

Figure II 13 : Vitesse de vent, Vitesse mécanique de la turbine sans boucle de réglage.

II-4 Recherche du rendement maximum de la turbine MPPT

II-4-1 Stratégies de maximisation de puissance MPPT

Nous allons également proposer une stratégie de commande de la turbine qui permettra de régler sa vitesse de rotation, de sorte à optimiser la puissance extraite, quelque soient la fluctuation de la vitesse du vent. Pour ce faire, nous allons dans premier temps utiliser un régulateur PI pour obtenir un meilleur fonctionnement quel que soit la variation du vent.

II-4-2 Stratégie de maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse

Cette technique consiste à ajuster la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quel que soit la vitesse du vent considérée comme grandeur perturbatrice afin d'obtenir le maximum de puissance générée, donc le maximum du couple électromagnétique[25].

La puissance mécanique de la génératrice est donnée par :

$$P_{mec} = C_{mec}\Omega_{mec}. \quad (II.13)$$

On suppose que la machine électrique et son variateur sont idéaux et donc, quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé est à tout instant égal à sa valeur de référence

$$C_{em} = C_{em-ref}. \quad (II.14)$$

Le couple électromagnétique de référence C_{em-ref} permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence Ω_{ref} est donné par la relation suivante :

$$C_{em-ref} = Reg(\Omega_{ref} - \Omega_{mec}). \quad (II.15)$$

Avec:

$$\Omega_{ref} = G.\Omega_{tur_ref}. \quad (II.16)$$

La référence de la vitesse de la turbine permettant d'obtenir une valeur maximale du couple.

$$\Omega_{tur_ref} = \frac{\lambda_{opt}V}{R}. \quad (II.17)$$

Le schéma bloc de cette stratégie est donné par la Figure (II.14).

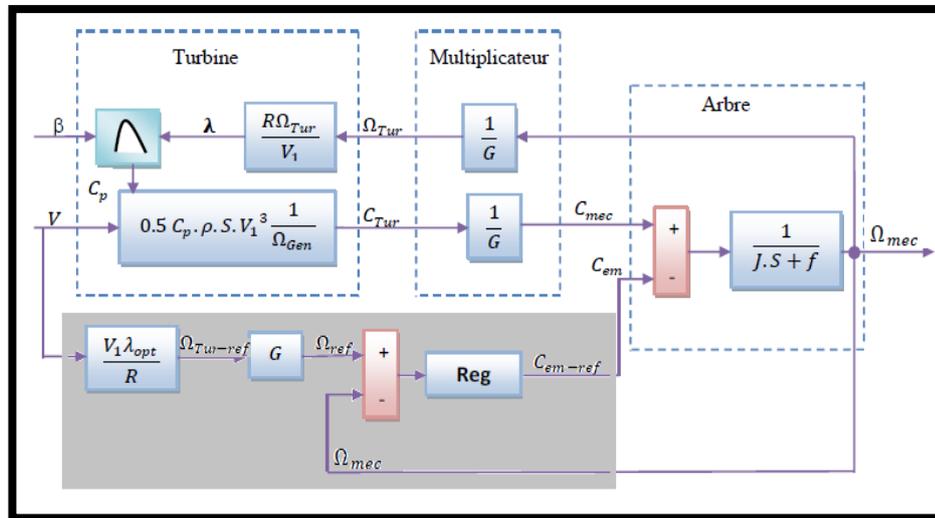


Figure II 14 : Contrôle MPPT avec Asservissement de la vitesse mécanique.

L'action du correcteur de vitesse doit accomplir deux tâches :

- Il doit asservir la vitesse mécanique à sa valeur de référence.
- Il doit atténuer l'action du couple éolien qui constitue une entrée perturbatrice.

II-4-3 Asservissement de vitesse de la turbine

Différentes technologies du correcteur peuvent être considérées pour l'asservissement de la vitesse. En générale, l'objectif d'un système de commande est de minimiser l'écart $e(t)$ entre la sortie d'un système et la valeur de consigne désirée. Cet écart peut être dû, soit à un changement de consigne, soit à des perturbations agissant sur le système. Pour choisir un bon réglage du régulateur, on prend en compte l'amplitude maximum de l'écart et la durée nécessaire pour qu'il s'annule après une perturbation ou un changement de consigne.

La vitesse est influencée par l'application de trois couples : un couple éolien, un couple résistant et un couple électromagnétique. Dans notre travail, nous avons effectué deux types de régulation pour asservir la vitesse mécanique

II-4-4 Réglage de vitesse par régulateur de type classique PI

L'approche la plus classique utilisée dans notre travail consiste à contrôler la vitesse par un régulateur PI. Dans l'objectif d'annuler l'erreur statique et réduire le temps de réponse tout en conservant la stabilité du système, un correcteur proportionnel intégral est utilisé (MADA).

Les performances obtenues (stabilité, précision, temps de réponse) sont satisfaisantes pour un tel système électromécanique.

Pour l'étude, il est supposé que quelle que soit la puissance générée, le couple électromagnétique développé à tout instant est égal à sa valeur de référence :

$$C_{em} = C_{em-ref} \tag{II.18}$$

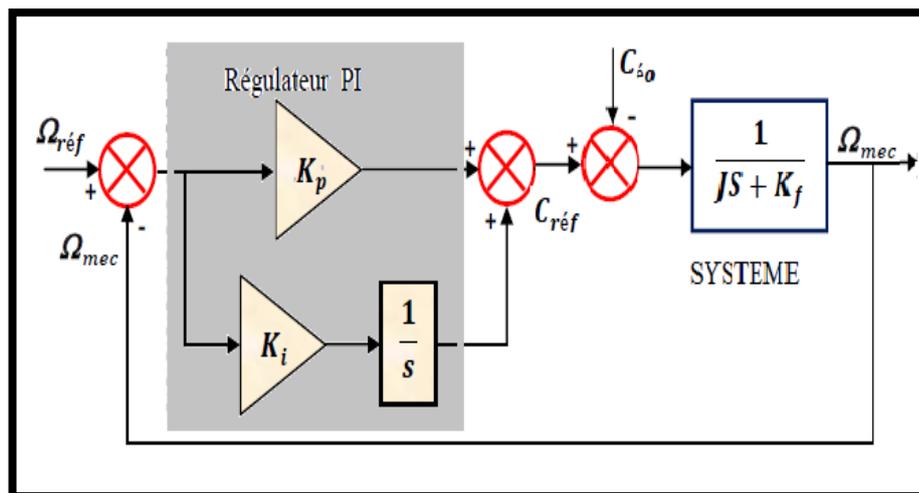


Figure II 15 : Schéma bloc de la régulation de vitesse par régulateur PI.

La partie mécanique du système est représentée par l'équation de transfert établie à partir de l'équation mécanique de la machine utilisée. Le calcul des paramètres du régulateur (les deux gains K_p et K_i sont réalisés en spécifiant une réponse en boucle fermée)[25].

II-4-5 Résultats obtenus avec la structure de MPPT avec asservissement de vitesse

Après avoir simulé le schéma de la figure (II.13) sous MATLAB_SIMULINK, nous avons obtenu les résultats illustrés sur la figure (II.16) Ces résultats montrent qu'un meilleur contrôle en boucle fermée de la vitesse est obtenu en régime transitoire et en régime permanent.

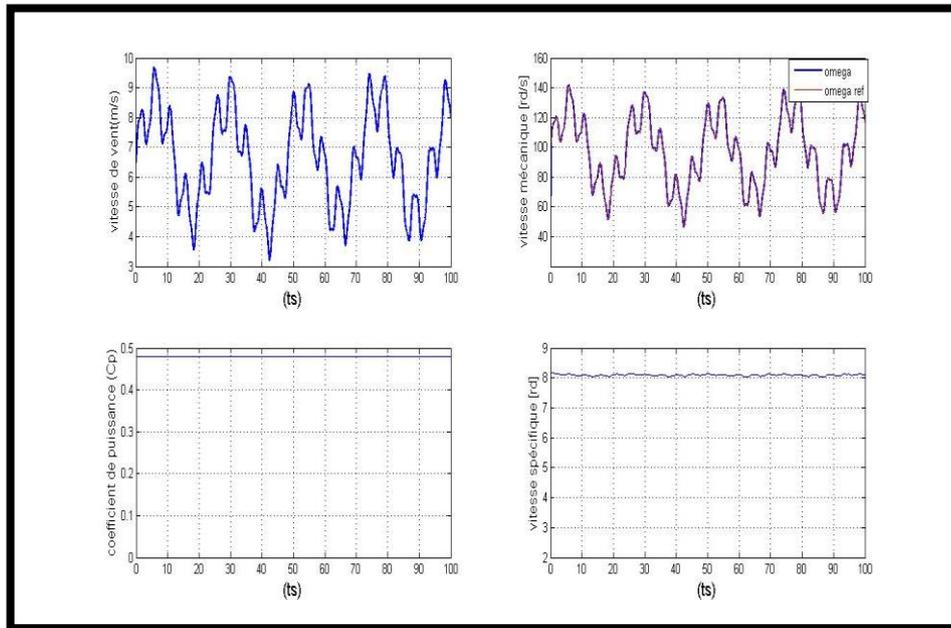


Figure II 16 : Résultats du MPPT obtenus avec régulateur PI

II-5 Modélisation et Simulation De La (MADA)

II-5-1 Introduction

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) porte un caractère qui permet d'occuper un large domaine d'application.

Ce type de machine est utilisé comme génératrice dans la plupart des projets de centrale éolienne, car il offre de grands avantages de fonctionnement.

Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseur statique (convertisseur matriciel). Etant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion de cette génératrice[17]. Il existe plusieurs types de machine asynchrone à double alimentation.

Nous allons commencer cette étude par une description générale de la MADA ainsi que ses modes de fonctionnement, ces applications et ces avantages, ensuite, nous allons présenter son modèle mathématique pour étudier les comportements et élaborer des commandes des différents types des machines

Nous proposons la modélisation classique de la machine asynchrone à double alimentation en utilisant la transformation de PARK. Enfin nous terminerons par des interprétations des résultats de simulation de la MADA.

II-5-2 Description de la MADA

La Machine Asynchrone à Double Alimentation présente un stator analogue à celui d'une machine triphasée classique (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. (Figure II.17).

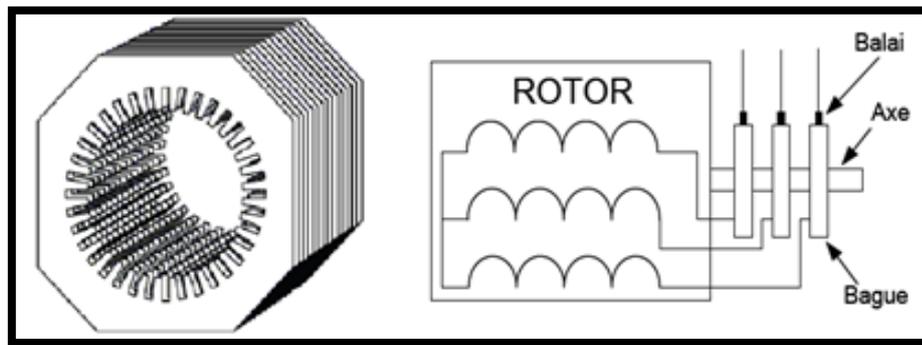


Figure II 17 : Structure de la machine asynchrone à double alimentation.

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile et dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tournée.

II-5-3 Mode de fonctionnement de la MADA

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 définit le mode de fonctionnement moteur ou générateur.

Effectivement, 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 rotorique qui permet de gérer le champ magnétique à l'intérieur de la machine, offrant ainsi la possibilité de fonctionner en **hyperou hypo synchronisme** aussi

bien en mode moteur qu'en mode générateur. Nous allons présenter successivement ces différents modes de fonctionnement[13],[25].

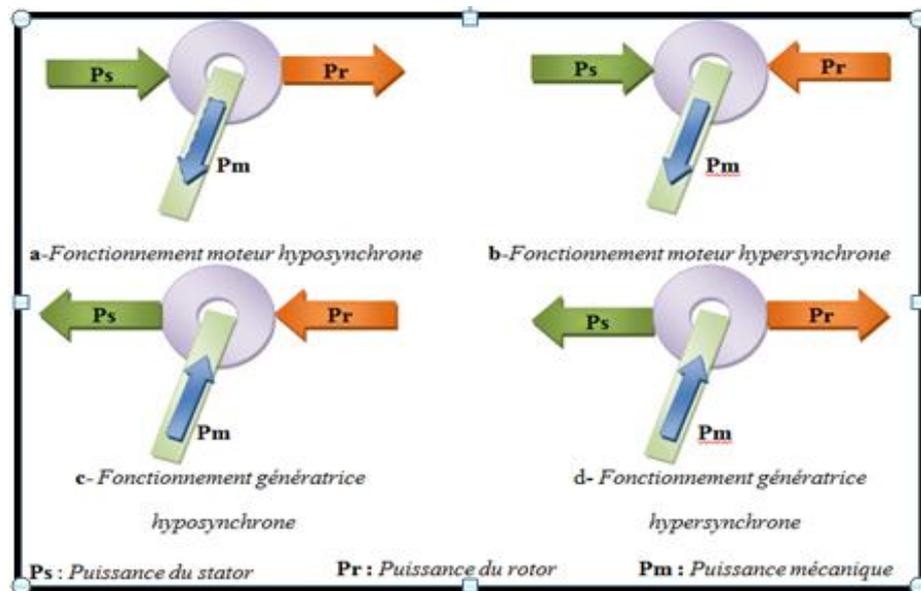


Figure II 18 : Les quatre quadrants du fonctionnement de la MADA.

1-Fonctionnement moteur hyposynchrone ($g > 0$) :

Le fonctionnement en mode hyposynchrone du moteur est réalisé lorsqu'il s'agit d'une plage de réglage de vitesse s'étendant de la vitesse de synchronisme à une vitesse plus faible. La puissance est fournie par le réseau au stator ; la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, la puissance de glissement est renvoyée sur le réseau via les convertisseurs connectés au rotor.

2-Fonctionnement moteur hypersynchrone ($g < 0$) :

Le fonctionnement en mode hypersynchrone du moteur est réalisé lorsque la vitesse de la machine peut varier au-delà de la vitesse de synchronisme. Dans ce mode de fonctionnement une partie de la puissance fournie par le réseau va au rotor via les convertisseurs statiques est convertie en puissance mécanique.

3-Fonctionnement générateur hyposynchrone ($g > 0$) :

Dans ce mode de fonctionnement la puissance est fournie par le dispositif d'entraînement, dans notre cas la turbine éolienne ; une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor.

4-Fonctionnement générateur hypersynchrone ($g < 0$) :

Dans ce mode de fonctionnement, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine par la turbine éolienne est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à est transmise par l'intermédiaire du rotor.

II-5-4 Domaine d'applications de MADA

La machine asynchrone double alimentation est occupée une large place dans les applications industrielles et sur tout en mode générateur dans les applications d'énergie renouvelable notamment dans les systèmes éoliens. De plus, le fonctionnement en générateur présente la MADA comme une alternative sérieuse aux machines synchrones classiques dans de nombreux systèmes de production d'énergie décentralisée telles que :

- Les générateurs des réseaux de bord des navires ou des avions.
- Les centrales hydrauliques a débit et vitesse variable.
- Les groupes électrogènes pour lesquels la réduction de vitesse pendant les périodes de faible consommation permet de réduire sensiblement la consommation de carburant. [25]

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

- La métallurgie avec les enrouleuses et les dérouleuses de bobines.
- La traction, avec notamment des applications de type transport urbain ou propulsion maritime.
- L'application de levage, les ascenseurs, les monte-charges [34]

II-5-5 Avantages et inconvénients

Cette configuration a l'avantage de réaliser des économies sur les convertisseurs de puissance car la puissance transitée par le circuit rotorique est faible par rapport à la puissance statorique dans la configuration classique.

Les principaux avantages et inconvénients de l'utilisation de cette génératrice.

II-5-5-1 Avantages de la MADA

Le principale avantage de la MADA est la possibilité de fonctionner à vitesse variable ce qui permet :

- l'accessibilité au stator et au rotor offre l'opportunité d'avoir plusieurs degrés de liberté pour bien contrôler le transfert des puissances et le facteur de puissance avec toutes les possibilités de récupération ou l'injection de l'énergie dans les enroulements de la machine.
- la capacité de pouvoir augmenter la plage variation de la vitesse autour de la vitesse de synchronisme. De plus, l'application de la commande vectorielle associée à une technique de commande moderne permet d'obtenir un couple nominale sue une grande plage de vitesse.

- 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 les hautes préférences dynamiques en termes de temps de réponse, de minimisation des harmoniques et d'amélioration de rendement.
- l'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille des convertisseurs d'environ 70% en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotorique. Ce dispositif est par conséquent économique.
- en fonctionnement générateur, l'alimentation du circuit rotorique a 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 les résistances placée dans le circuit rotorique, et encore sa possibilité de démarrer sans demander un courant important du réseau.
- un fonctionnement en régime dégradé, si l'un des deux onduleurs tombe en panne, plus souple que la machine à simple alimentation.

II-5-5-2 Inconvénients de la MADA

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 suivant :

- elle est plus volumineuse qu'un MAS à cage de puissance équivalente. L'aspect multi-convertisseur, augment le nombre de convertisseurs et par conséquent le prix.
- un autre inconvénient apparait lors de l'étude de cette machine, ce dernier est la stabilité notamment en boucle ouvert. En effet, dans le cas de la machine asynchrone conventionnelle celle-ci est garantie par la relation fondamentale de l'autopilotage réalisant l'asservissement de la vitesse par la fréquence du stator. Par conséquent, les deux forces magnétomotrices du stator et du rotor deviennent synchronisées. Mais dans le cas de la machine asynchrone à double alimentation, la rotation des forces magnétomotrices devient fonction des fréquences imposées par les deux sources d'alimentation externes. De ce fait, une certaine synchronisation entre elles est exigée afin de garantir une stabilité à la machine[35].

II-5-6 Modélisation De La Machine Asynchrone à Double Alimentation

La modélisation de la MADA nous permet de comprendre ses principes de fonctionnement physique et d'établir un modèle d'action conduisant au calcul des correcteurs pour réaliser sa commande ainsi que sa simulation en régimes dynamique et permanent[3].

La machine est représentée par son modèle de Park dont les équations sont établies dans un référentiel où les puissances sont conservées. Les équations de la MADA dans un repère tournant à la vitesse électrique et pour un rotor tournant à la vitesse électrique sont données comme suit :

Les tensions :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

Les flux :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_s I_{ds} + L_m I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s I_{qs} + L_m I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r I_{dr} + L_m I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r I_{qr} + L_m I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Les puissances :

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \\ P_r = V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr} \\ Q_r = V_{qr} I_{dr} - V_{dr} I_{qr} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Equation mécanique :

Le couple électromagnétique est exprimé en fonction des flux statoriques et courants rotoriques

$$C_{em} = p(\Phi_{dr}i_{qs} - \Phi_{qr}i_{ds}) \quad (II.22)$$

II-5-7 Modèle de la MADA avec choix de repère

la transformation de Park, définie par la matrice de rotation $[A(\theta)]$, permet de ramener les variables du repère triphasé (a,b,c) sur les axes d'une repère diphasé tournant (d, q, 0). Les grandeurs statorique et rotoriques sont alors exprimées dans un même repère (Figure (II.1)). [28]

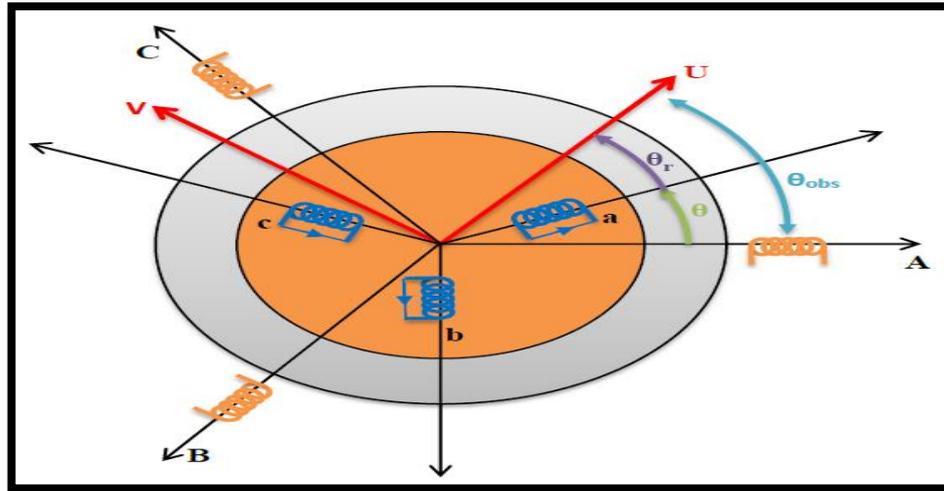


Figure II 19 : Représentation du modèle de Park.

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tensions et flux un changement de variables faisant intervenir l'angle θ_{obs} entre l'axe d'une phase statorique et le système d'axes (u,v,o). Il existe deux matrices permettant cette transformation, celle qui conserve les puissances et celle qui conserve les amplitudes, dans ce travail nous ne utiliserons que la transformation qui conserve les puissances et son inverse données respectivement par [11],[36]:

A partir de cette transformation, on définit une matrice appelée matrice de Park donnée par :

$$[A] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (II.23)$$

La matrice inverse de Park inverse donnée par :

$$[A]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & -\sin(\theta + 2\pi/3) & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.24})$$

Le changement de variable relatifs aux (courants, tensions et flux) est défini par :

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_o \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.25})$$

Après l'application de la transformation de Park on trouve le système d'équation qui représente le modèle de la MADA dans le repère (d, q).

1- Equations des tensions

Pour le stator :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \\ V_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\phi_{os}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega_r) \phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \phi_{dr} \\ V_{or} = R_r i_{or} + \frac{d\phi_{or}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

2-Équations des flux

Pour le stator :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \\ \phi_{os} = L_s i_{os} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Pour le rotor :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \\ \phi_{or} = L_r i_{or} \end{cases} \quad (\text{II.29})$$

Si on élimine la composante homopolaire, les équations des flux dans la machine s'expriment sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \\ \phi_{dr} \\ \phi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

Avec :

$$(M = \frac{3}{2} M_{max}) \quad , \quad (\omega = \omega_s - \omega_r)$$

3-Le couple électromagnétique

Le couple électromagnétique de la machine peut s'exprimer sous différentes formes, en choisie l'équation suivant :

$$C_e = -\frac{3PM}{2L_s} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \quad (\text{II.31})$$

M: Inductance mutuelle.

Dans un repère diphasé quelconque les puissances actives et réactives sont exprimées par :

Au niveau du stator

$$\begin{cases} P_s = V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs} \\ Q_s = V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

Au niveau du rotor

$$\begin{cases} P_r = V_{rd} I_{rd} + V_{rq} I_{rq} \\ Q_r = V_{rq} I_{rd} - V_{rd} I_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

II-6 Résultat de simulation de la MADA à Vide

Les Figure II (20, 21, 22, 23) représente les résultat de simulation des Puissances, Courants, Couple, La Vitesse et les Flux de la MADA.

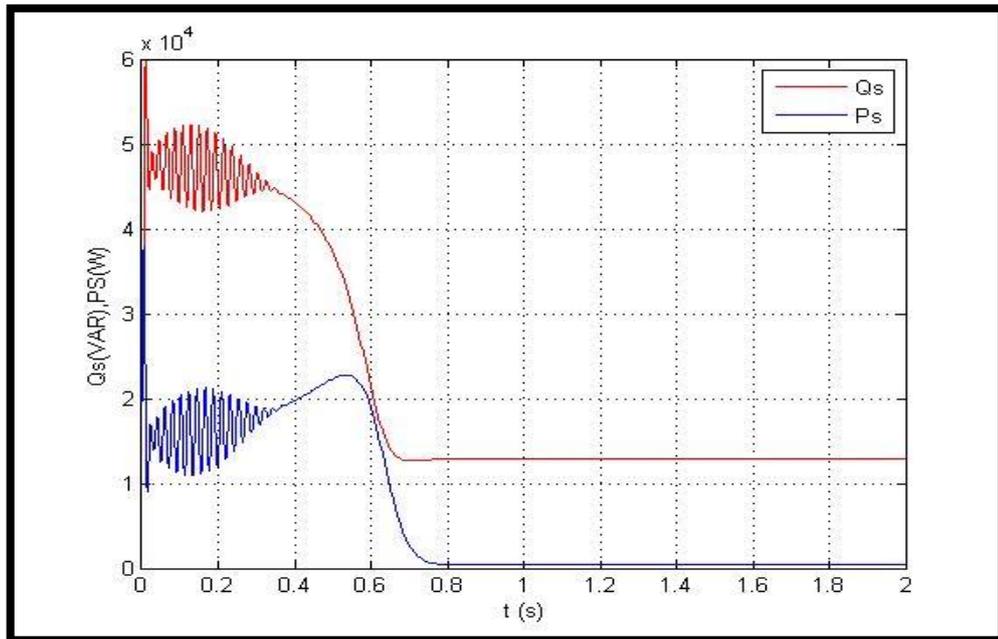


Figure II 20 : Puissance active(P_s) et réactive(Q_s).

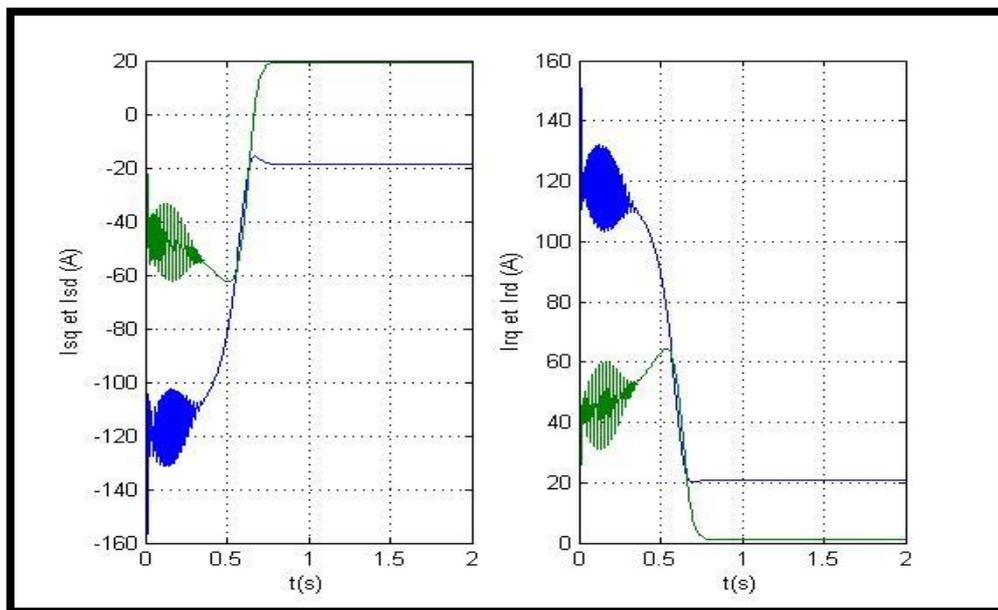


Figure II 21 : courants statorique et rotorique

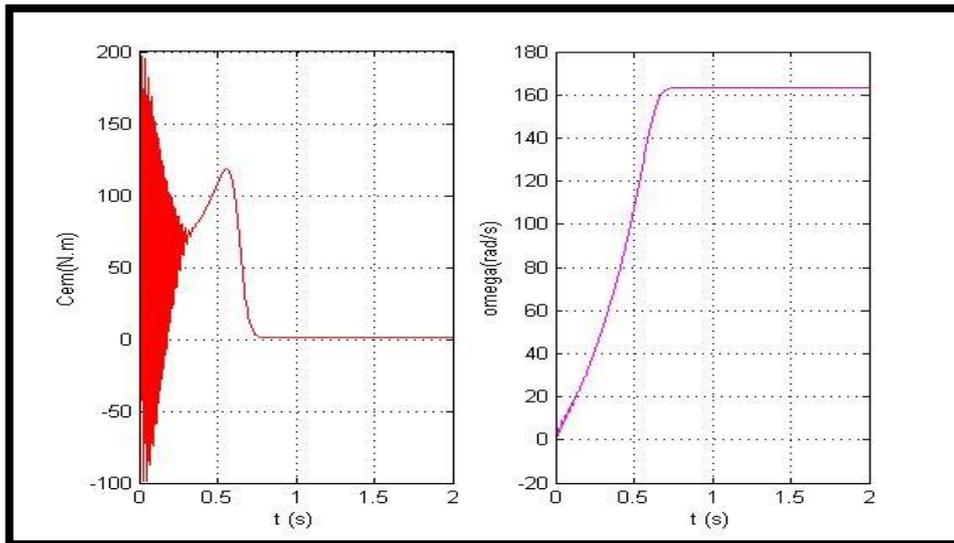


Figure II 22 : Couple électromagnétique et Vitesse du MADA

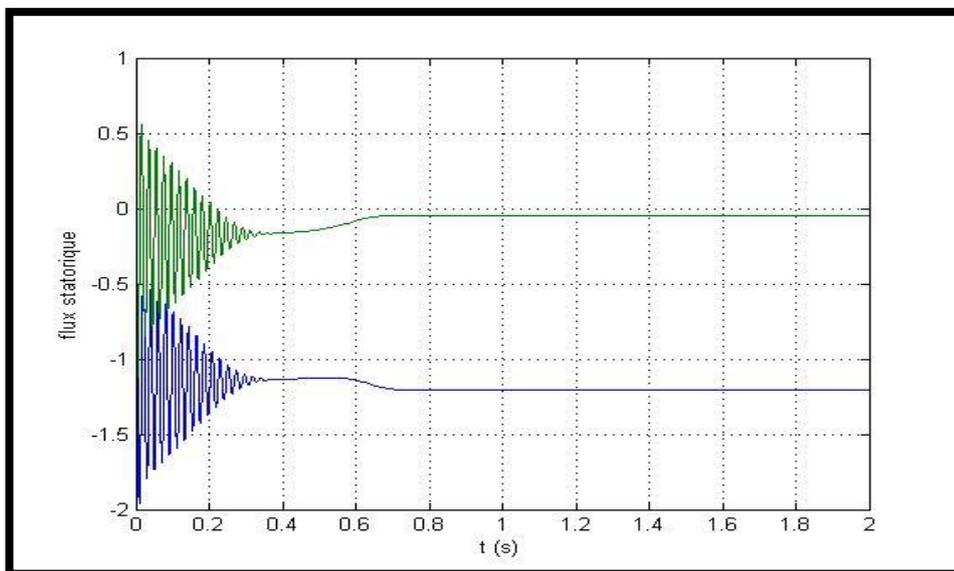


Figure II 23 : les flux statorique

II-7 Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressés à la modélisation et la commande du système éolien à base de la MADA. En premier lieu, les modèles analytiques des différents constituants du système éolien ont été établis. Une représentation de schéma bloc alors été menée avant de procéder à la synthèse d'un système de commande.

Ensuite, nous avons présenté le modèle mathématique de la turbine et de la machine asynchrone à double alimentation en vue d'une alimentation triphasée sinusoïdale. Le modèle triphasé, obtenu sous certaines hypothèses simplificatrices, s'est réduit en un modèle biphasé à l'aide de la transformation de PARK.

En plus de ça nous avons terminé ce chapitre par une simulation de la machine (MADA).