



Application de la Commande LQ sur un Système Eolien

M.Chieul^{#1}, L.Mehennaoui^{*2}

[#] Département Génie Electrique, Université du 20 aout 1955
Skikda Algérie

¹chieulmeriem@yahoo.fr

²me_lamine@yahoo.fr

Résumé— Ce travail s'inscrit dans le cadre général de la recherche de plus en plus accrue au niveau mondial d'énergies renouvelables et non polluantes. L'énergie éolienne est la plus prometteuse. L'aspect dynamique, la nature turbulente du vent, à la fois entrée indispensable pour le fonctionnement de l'éolienne et considéré comme perturbation ainsi que la forte non-linéarité de l'aérodynamique de l'éolienne montrent la complexité de commander une éolienne. L'étude présentée ici sur la génération d'une loi de commande qui est ici le couple électromagnétique en vue de maximiser la capture de l'énergie aérodynamique fournie par le vent, tout en minimisant les variations de ce couple électromagnétique. En agissant ainsi on améliore la durée de vie de l'arbre de l'éolienne. Pour atteindre cet objectif il est donc nécessaire de disposer de certaines techniques de commande plus avancée et plus performantes telle que la commande LQ pour assurer une commande optimale répondant aux exigences de performance et faisabilité des systèmes éoliens.

Mots-clés— Eolienne, Système non linéaire, Commande vectorielle, Commande LQ, Régulateur PI, Régulateur RST.

I. INTRODUCTION

Les sources d'énergie renouvelable, permettant une production décentralisée de l'électricité, et peuvent ainsi contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique. Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme [1]. L'énergie éolienne reste l'énergie la plus prometteuse en effet, c'est une énergie complètement propre, elle n'émet ni déchet ni gaz à effet de serre ([2], [3]). Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elle-même transformée en énergie électrique grâce à une génératrice. L'étude porte sur un système éolien de petite puissance à angle de calage fixe et à vitesse variable avec un multiplicateur flexible, la partie électrique consiste en

un générateur asynchrone à cage d'écureuil pour la transformation de l'énergie mécanique produite par l'arbre à grande vitesse qui se trouvant au niveau du multiplicateur flexible. L'objectif principal de ce type de système éolien est l'optimisation de la capture de l'énergie disponible dans le vent puisque nous considérons le cas particulier où la vitesse de rotation de l'arbre de l'éolienne n'a pas encore atteint sa valeur nominale. Une commande vectorielle de type indirecte est utilisée pour commander le couple électromagnétique et le courant statorique [5]. La variable commandée est le couple électromagnétique, le choix de la commande s'est portée sur une commande LQ qui occupe une large place parmi la commande optimale, elle est plus performante et prend mieux en compte les perturbations. Le critère de performance considéré réunit à la fois une performance d'énergie et une performance de fiabilité [6]. Donc on considère que l'optimisation est réalisée au moyen d'une boucle de suivi de la vitesse de rotation. Pour assurer une usure lente de l'arbre de l'éolienne la commande choisie doit diminuer les variations du couple électromagnétique.

II. LA COMMANDE LQ DU SYSTEME EOLIEN

Le problème considéré consiste en le suivi d'une consigne de vitesse de rotation variable, calculée en fonction de la vitesse du vent conformément à l'équation (1):

$$\Omega_{opt}(t) = \frac{\lambda_{opt}}{R} \cdot v(t) \quad (1)$$

La principale caractéristique de l'approche présentée est que le modèle du processus est un modèle discrétisé en un pas, obtenu par identification expérimentale [4]. Soit la fonction de transfert du processus représentée par l'équation (2) :

$$H_p(z^{-1}) = z^{-d} \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} \quad (2)$$



Sachant que :

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1}$$

$$B(z^{-1}) = b_1 z^{-1} + \dots + b_{nb} z^{-nb}$$

L'équation entrée-sortie correspondante est donnée par l'équation (3) :

$$y_1(i) = -\sum_{k=1}^{na} a_k y(i-k) + \sum_{k=1}^{nb} b_k u(i-k-d) \quad (3)$$

La commande LQ est basée sur la minimisation d'un critère quadratique qui consiste à pondérer les variances du signal de commande $u(t)$ et de l'erreur de poursuite $e(t+1)$ ([8], [9]).

L'expression la plus simple du critère de performance est donnée par l'équation (4) :

$$J = [y_{opt}(i+1) - y(i+1)]^2 + \alpha \cdot \Delta u^2(i) \quad (4)$$

Où y et u sont respectivement la vitesse de rotation et le couple de la génératrice et α est un paramètre de pondération. La commande optimale s'obtient à partir de la condition (5) :

$$\frac{\partial J}{\partial (\Delta u)} = 0 \quad (5)$$

La référence $y_{opt}(i+1)$ est considérée comme connue, à l'inverse, la variable $y(i+1)$ doit être remplacée par une prédiction $\hat{y}(i+1)$. Remplacée dans le critère de performance, elle donne l'équation(6):

$$J = [y_{opt}(i+1) - [1 + A^*(q^{-1})]y(i) + A^*(q^{-1})y(i-1) - B^*(q^{-1})\Delta u(i-1) - b_1 u(i)]^2 + \alpha \Delta u^2(i) \quad (6)$$

Où :

$$\eta = \frac{b_1}{\alpha + b_1^2}$$

Et après l'utilisation de la condition (5), on obtient notre commande optimale qui peut être implémentée comme un régulateur RST selon les équations (7) :

$$\begin{aligned} R(z^{-1}) &= \eta [1 + a_1 + (a_2 - a_1)z^{-1} + \dots + (a_{na} - a_{na-1})z^{-na+1} - a_{na}z^{-na}] \\ S(z^{-1}) &= [1 + \eta (b_2 z^{-1} + b_3 z^{-2} + \dots + b_{nb} z^{-nb+1})] \cdot (1 - z^{-1}) \\ T(z^{-1}) &= \eta \end{aligned} \quad (7)$$

III. SIMULATION DU SYSTÈME GLOBAL

Dans cette partie, nous allons présenter la poursuite pour établir une étude en simulation de la chaîne de conversion éolienne, ainsi la commande LQ citée précédemment. Les résultats issus de cette simulation, seront discutés afin d'éclaircir mieux le comportement des différentes parties constituant l'éolienne et présentées dans un environnement Matlab/Simulink.

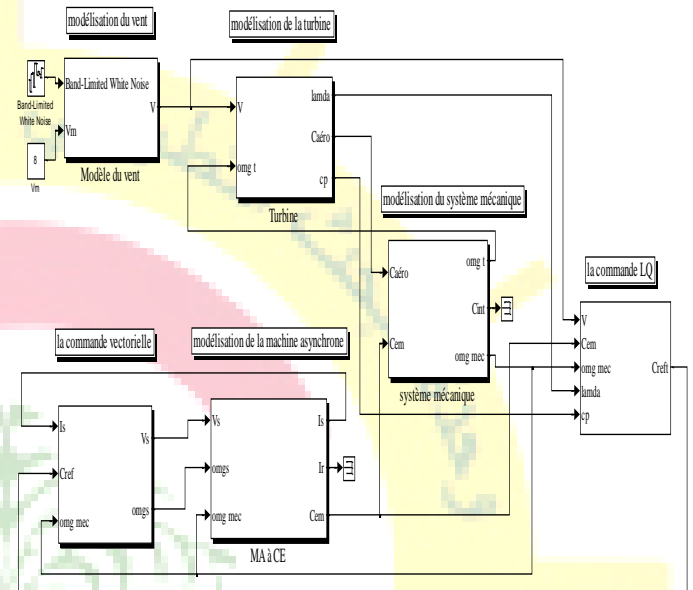


Fig. 1 Schéma bloc du système global.

A. Modèle du Vent

L'aéro turbine filtre les fluctuations de hautes fréquences. On reconstitue à cet effet un filtre passe bas à la composante de turbulence afin que celle-ci reproduise une caractéristique plus proche de la réalité et qui correspondant à une vitesse stable du vent de 8 m/s qu'on va représenter par la figure suivante :

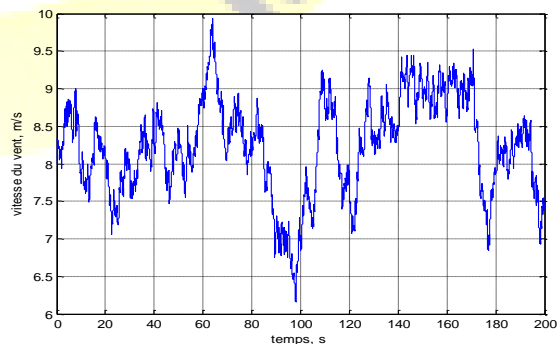


Fig. 2 Profil de la vitesse du vent.



B. Modélisation de la Turbine

Dans cette partie on constate que l'expression du coefficient de puissance C_p de notre éolienne peut être approchée par l'équation (8) [10].

$$C_p(\lambda, \beta) = \left(c_2 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) - c_3 \right) e^{-c_5 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right)} \quad (8)$$

avec : $c_1 = 0.5109$ $c_2 = 116$ $c_3 = 0.4$
 $c_4 = 5$ $c_5 = 21$ $c_6 = 0.0068$

Pour illustrer le comportement de la turbine, nous avons simulé le coefficient de puissance pour $\beta=0$ afin d'obtenir C_{pmax} et λ_{opt} .

C. Modélisation du Multiplicateur Flexible

Entre la turbine éolienne et la génératrice il y a un multiplicateur de vitesse flexible, qui a pour but d'adapter la vitesse de la turbine.

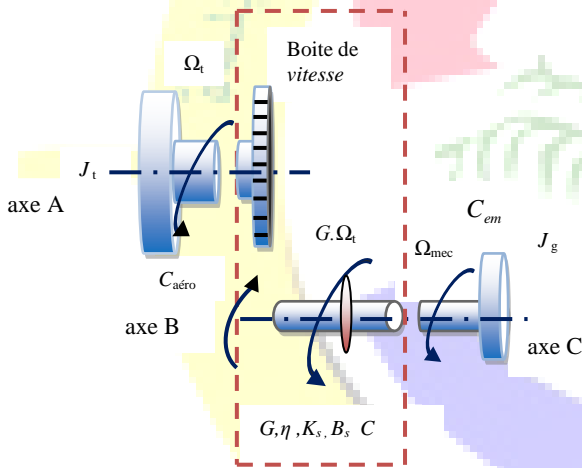


Fig. 3 Les éléments d'un multiplicateur flexible.

1) *Modèle du Multiplicateur Flexible*: Le modèle de ce type de multiplicateur qui est composé de l'axe B et de l'axe C et la dynamique du couple interne [6] est donné par les équations (9 et 10).

$$\begin{cases} \dot{\Omega}_t = 1/J_t \cdot C_{aéro} - G/(J_t \cdot \eta) \cdot C \\ \dot{\Omega}_{mec} = 1/J_g \cdot C - 1/J_g \cdot C_{em} \\ \dot{C} = K_s \cdot (G \cdot \Omega_t - \Omega_{mec}) + B_s \cdot [G \cdot \dot{\Omega}_t - \dot{\Omega}_{mec}] \end{cases} \quad (9)$$

On note par J_g l'inertie de l'axe C et par J_B l'inertie de l'axe B qui est donné par :

$$J_B = \eta/G^2 \cdot J_t$$

La représentation d'état de ce modèle :

$$\begin{cases} \dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{G \cdot J_B} \\ 0 & 0 & \frac{1}{J_B} \\ G \cdot K_s & -K_s & -B_s \cdot \left(\frac{1}{J_B} + \frac{1}{J_g} \right) \end{bmatrix} \cdot X + \begin{bmatrix} \frac{1}{J_t} & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_g} \\ \frac{G \cdot B_s}{J_t} & \frac{B_s}{J_g} \end{bmatrix} \cdot U \\ Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot X \end{cases} \quad (10)$$

D. Modélisation de la Générateur à Cage d'Ecureuil

Le modèle de la machine asynchrone est déduit de la machine biphasée en supposant que les variables sont exprimées dans un référentiel $d-q$ tournant à la vitesse du champ électrique. Dans cette étude, les courants statoriques (i_{ds} , i_{qs}) et les courants rotoriques (i_{dr} , i_{qr}) sont considérés comme variables d'état du modèle [11], l'entrée est la tension statorique et la sortie est le couple électromagnétique.

$$\begin{cases} \dot{X} = A \cdot X + B \cdot U \\ Y = C_{em} = \frac{3}{2} p \frac{L_m}{L_r} (x_2 x_3 - x_1 x_4) \end{cases} \quad (11)$$

Avec

$$\begin{cases} X = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T = [i_{ds} \ i_{qs} \ i_{dr} \ i_{qr}]^T \\ U = [V_{sd} \ V_{sq}]^T \end{cases}$$

E. La Commande Vectorielle

Pour la commande vectorielle de la machine, deux régulateurs PI sont utilisés assurant la commande et le découplage des courants i_{sd} et i_{sq} comme le montre le schéma simulink de la figure. 4.



TABLEAU II
PARAMETRES DU SYSTEME

| Sous Systèmes Eolien | Paramètres du Système Eolien | | |
|--|---|---|--|
| turbine | rayon le Coefficient de puissance maximal rapport de vitesse Inertie du rotor | R $C_{p\max}$ λ_{opt} J_t | 11.6 m 0.465 6.39 102.8 Kg m^2 |
| multiplicateur flexible | raport de transmission efficacité de la transmission raideur amortissement | G η K_s B_s | 23.75 0.8 2700 Nm/rad 0.12700 Nm/rad |
| génératrice asynchrone à cage d'écurueil | la résistance statorique l'inductance statorique l'inductance mutuelle le couple maximal La résistance rotorique L'inductance statorique Nombre de paires de pôles Inertie | R_s L_s L_m Cem_{\max} R_r L_r P J_g | 0.0092 Ω 0.006886 H 0.0067 H 2.05*10 ⁴ Nm 0.0061 Ω 0.007127 H 3 4.5 Kg m^2 |

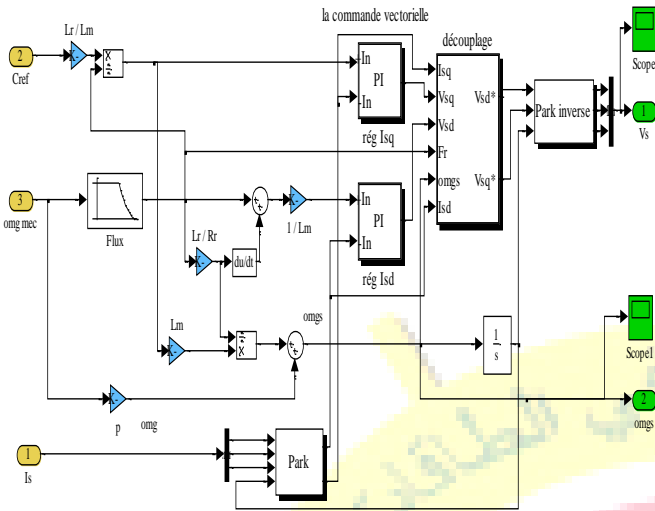


Fig. 4 Le modèle de la commande vectorielle indirecte de la GACE.

1) Paramètres des Régulateurs PI : Les paramètres des régulateurs PI assurant la correction et le découplage des courants statoriques sont donnés par le Tableau 1.

TABLEAU I
PARAMETRES DES REGULATEURS

| Paramètres du Système Eolien | | |
|------------------------------|-------|-------|
| | K_p | K_i |
| courant i_{sd} | 1 | 1000 |
| courant i_{sq} | 2 | 2000 |

IV. MÉTHODE PROPOSÉE

Pour obtenir le modèle d'entrée-sortie discret décrit précédemment, une procédure d'identification est nécessaire. Dans notre étude, La méthode d'identification utilisée est la « méthode de la variable instrumentale IV » [7].

A. Paramètres du système

Les paramètres du système éolien sont donnés dans le Tableau 2.

B. Identification du Système

L'identification du système en boucle ouverte est réalisée sur un état stable correspondant à une vitesse stable du vent de 8 m/s qu'on va représenter par la figure. 5.

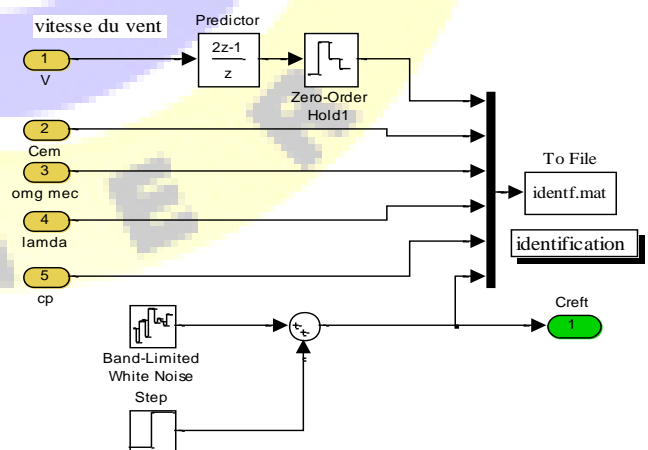


Fig. 5 La structure d'identification du système éolien.



En fonction de la vitesse du vent et le signal d'excitation pseudo-aléatoire, on excite le système pour établir une identification du système et trouver la variation de la vitesse de rotation.

Donc Le modèle obtenu par identification est donné par les équations (12).

$$\begin{cases} A(q^{-1}) \cdot y(t) = B(q^{-1}) \cdot u(t) + e(t) \\ A(q^{-1}) = 1 - 2.275 \cdot q^{-1} + 1.521 \cdot q^{-2} - 0.246 \cdot q^{-3} \\ B(q^{-1}) = -0.0001616 \cdot q^{-1} + 0.0001095 \cdot q^{-2} + 0.0006955 \cdot q^{-3} \end{cases} \quad (12)$$

C. Génération des Régulateurs RST

Après l'identification du système et à l'aide de l'équation (12), on peut générer plusieurs régulateurs de type RST pour trouver les valeurs des polynômes $R(z^{-1})$, $S(z^{-1})$ et $T(z^{-1})$.

L'approche utilisée consiste à faire varier le poids α qui pondère les variations du signal de commande et de chercher le régulateur optimal qui donne à la fois un meilleur suivi et un minimum d'effort de commande.

1) Pour $\alpha = 0.001$: Le régulateur RST est donné par l'équation (13).

$$\begin{cases} R(z^{-1}) = -0.5292 + 0.6134 \cdot z^{-1} - 0.2857 \cdot z^{-2} + 0.03987 \cdot z^{-3} \\ S(z^{-1}) = 1 - 1 \cdot z^{-1} - 9.47 \cdot 10^{-5} \cdot z^{-2} + 0.0001124 \cdot z^{-3} \\ T(z^{-1}) = -0.1616 \end{cases} \quad (13)$$

Les figures 6.a, 6.b, 6.c et 6.d représentent la simulation en boucle fermée de l'évolution de l'entrée de commande et de leur variation, l'évolution de rapport de vitesse et l'évolution du Coefficient de puissance. Le Régulateur ainsi choisi assure bien le suivi de trajectoire, les figures 6.c et 6.d montrent bien que le rapport de vitesse et le coefficient de puissance évoluent autour de leur valeur optimale $\lambda_{opt} = 6.3678$ et $C_{pmax} = 0.4763$.

La figure 6.b montre que pour réaliser cette performance de poursuite, un effort de commande assez conséquent est demandé au couple électromagnétique.

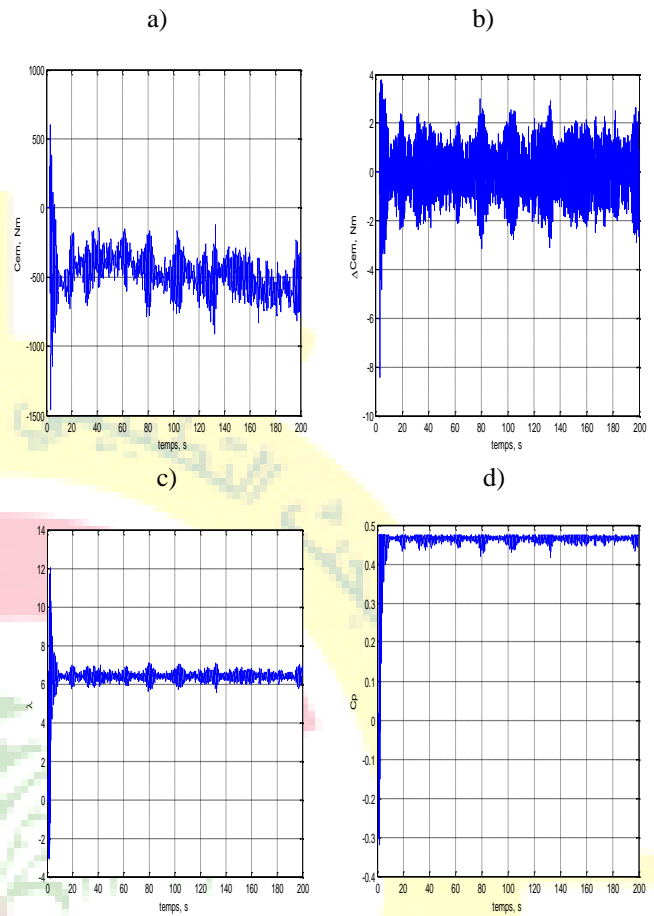


Fig. 6 Performance du RST pour $\alpha = 0.001$: a) l'évolution de l'entrée de commande, b) l'évolution de la variation de l'entrée de commande, c) l'évolution du rapport de vitesse et d) l'évolution du coefficient de puissance.

2) Pour $\alpha = 1$: Le régulateur RST est donné par l'équation (14).

$$\begin{cases} R(z^{-1}) = -0.0005292 + 0.0006134 \cdot z^{-1} - 0.0002857 \cdot z^{-2} + 3.987 \cdot 10^{-5} \cdot z^{-3} \\ S(z^{-1}) = 1 - 1 \cdot z^{-1} - 9.47 \cdot 10^{-8} \cdot z^{-2} + 1.124 \cdot 10^{-7} \cdot z^{-3} \\ T(z^{-1}) = -0.0001616 \end{cases} \quad (14)$$

Les résultats obtenus par ce choix sont représentés par les figures 7.a, 7.b 7.c et 7.d. Dans ce cas nous remarquons que la performance de poursuite est assez bien réalisée même si elle est un tant soit peu moins bonne que le cas précédent, néanmoins les variations de commande sont moins importantes (fig. 7.b) que dans le cas du régulateur précédent (fig. 6.b).

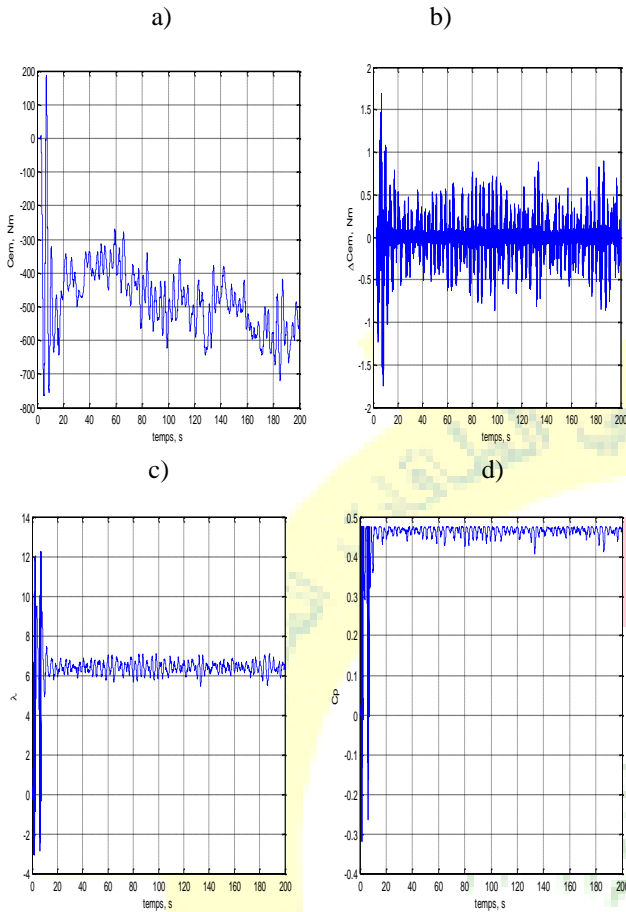


Fig. 7 Performance du RST pour $\alpha = 1$: a) l'évolution de l'entrée de commande, b) l'évolution de la variation de l'entrée de commande, c) l'évolution du rapport de vitesse et d) l'évolution du coefficient de puissance.

De ces remarques, le choix se porte directement sur le deuxième régulateur ($\alpha=1$) qui donne de bonnes performances de poursuite et de petites variations de commande (plus petit écart-type de couple). Ce choix est obtenu par un simple calcul de la moyenne et de l'écart type pour les trois grandeurs (le couple électromagnétique, le rapport de vitesse et le coefficient de puissance).

TABEAU III

MOYENNE ET ECART TYPE DU COUPLE ELECTROMAGNETIQUE, RAPPORT DE VITESSE ET COEFFICIENT DE PUISSANCE

| Grandeurs physiques | La moyenne et l'écart type des grandeurs | | | |
|---------------------|--|--------------|------------------|--------------|
| | m | | σ | |
| | $\alpha = 0.001$ | $\alpha = 1$ | $\alpha = 0.001$ | $\alpha = 1$ |
| C_{em} | -457.2009 | -457.2056 | 121.4501 | 120.6872 |
| λ | 6.4072 | 6.4049 | 0.8702 | 0.9071 |
| C_p | 0.4557 | 0.4546 | 0.0573 | 0.0602 |

V. CONCLUSIONS

Dans ce travail, une étude en simulation a été réalisée sur un système éolien. Le travail présenté ici a porté sur la conception de lois de commande permettant d'optimiser les performances des éoliennes à vitesse variable et à pas fixe. L'étude réalisée en simulation nous a permis de concevoir une méthode de commande assez puissante permettant d'assurer le suivi de trajectoire c-à-d le fonctionnement de l'éolienne à proximité de ses performances optimales tout en minimisant les efforts de commande (le couples électromagnétiques). Les résultats de simulation montrent l'efficacité de la méthode.

REFERENCES

- [1] (2001) Le site internet des energies renouvelables. [en ligne]. Disponible : http://www.fnh.org/francais/doc/en_ligne/energie/dossier_intro.htm
- [2] (2010) Le site internet du développement durable. [en ligne]. disponible: <http://www.energienouvelable.fr/energie-nouvelable.php>
- [3] (2011) Le site du blog de techno noirétable. [en ligne]. disponible : <http://teeoliennefoucauld20092010.wifeo.com/2-les-differents-types-deoliennes.php>
- [4] N. Khezami, "Commande multimodèle optimale des éolienne : Application à la participation des éolienne de la fréquence," thèse de doctorat délivré conjointement par l'école centrale, Lille, l'école supérieure des sciences et techniques, Tunis, 17/10/2011.
- [5] S. Khojet El Khil, "Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA)," Thèse Préparée en cotutelle au Laboratoire des Systèmes Electriques, Tunisie, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle, France, 2006.
- [6] I. Munteanu, A. Iuliana, B. Nicolao, A. Cutululis, E. Ceang, Ed, *Optimal Control of Wind Energy Systems: Towards a Global Approach*, ser. Notes de cours sur les approches globales. London : Springer, 2008, vol.300.
- [7] L. Ljung, Ed, *System Identification: Theory for the User*, ser. un livre pour l'identification des systèmes. Linkoping, Sweden :Springer, 1986, vol.315.
- [8] M. Mokhtari, M.Marie, Ed, *Applications de MATLAB 5 et SIMULINK 2 : Contrôle de procédés, Logique floue, Réseaux de neurones, Traitement du signal*. France: Springer, 1998, vol. 541.
- [9] B. Boukhezzar, "Les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes a vitesse variable," thèse de doctorat, université Paris, 23/2/2006.
- [10] S. Rechka, et G. Roy, "Modélisation de systèmes électromécaniques multi-masses à base de machines asynchrones, à l'aide des outils Matlab et Emt, avec application aux Eoliennes," Ecole Polytechnique de Montréal, juillet 2004.
- [11] J Ghouili « commande sans capteur d'une machine asynchrone avec estimation de la vitesse par réseaux de neurones » thèse de doctorat de l'université du Québec à Trois-Rivières, avril 2005.