

Commande non linéaire avec estimateur de vent d'une éolienne à vitesse variable

Boubekeur BOUKHEZZAR¹, Houria SIGUERDIDJANE²

¹GREYC Equipe Auto
6, bd du Maréchal Juin, F-14050 Caen, cedex France

² Département Automatique, Supélec
3, rue Joliot Curie, F-91192 Gif-sur Yvette, cedex France.

boubekeur.boukhezzar@greyc.ensicaen.fr, houria.siguerdidjane@supelec.fr

Résumé— Une approche non linéaire, avec estimateur de la vitesse du vent est proposée dans ce travail, pour la commande d'une éolienne à vitesse variable. L'objectif principal de la commande est l'optimisation de la capture de l'énergie du vent tout en limitant les charges sur les composantes de l'éoliennes, particulièrement le train de puissance. Quelques techniques de commande existantes ont été adaptées au modèle à deux masses de l'éolienne. Néanmoins, leurs performances restent faibles, vu qu'elles ne prennent pas en compte l'aspect dynamique du vent et de l'aéroturbine induisant des pertes de puissance importantes. De plus, elles ne sont pas robustes vis-à-vis des bruits de mesure et des perturbations. Afin d'apporter quelques améliorations, des commandes non linéaires par retour d'état statique ou dynamique avec estimateur de la vitesse du vent ont été proposées. Quoique ces approches soient aujourd'hui bien connues sur le plan théorique, leurs applications dans de nombreux domaines demeurent encore inexistantes et sont loin de détrôner les régulations classiques et ceci par manque de preuve d'efficacité et d'améliorations sur ce plan applicatif. Concernant l'estimation du vent, notre idée est d'exploiter la dynamique de l'éolienne elle-même. Toutes ces méthodes ont été testées avec le modèle à deux masses de l'éolienne implantée sur le site de NREL avec lequel nous avons mené une collaboration fructueuse. Les résultats de simulations montrent une nette amélioration des performances de l'approche proposée par rapport à celles déjà existantes.

Mots-clés— Eoliennes à vitesse variable, commande non linéaire, estimation vitesse du vent.

I. INTRODUCTION

L'énergie éolienne connaît, depuis le début des années 90, un fort regain d'intérêt, particulièrement dans l'union européenne, où sa croissance annuelle est de l'ordre de 20 %. Cette perspective d'augmentation de la production d'électricité d'origine éolienne, conformément aux engagements pris par la communauté européenne [1], nécessite alors le développement de méthodes et d'outils de production efficaces [2], [3]. Les éoliennes à vitesse variable (EVV) présentent beaucoup d'avantages par rapport aux anciennes éoliennes à vitesse fixe. La production annuelle d'énergie d'une EVV dépasse de 5 à 10 % celle d'une éolienne à vitesse fixe [4]. Les fluctuations de la puissance produite peuvent également être atténuées avec ce type d'éoliennes. Cependant, il a été montré que la stratégie de commande a un effet fondamental sur le comportement de l'éolienne et des charges transmises au réseau [5], et que

quel que soit le type d'éolienne, le système de commande reste un facteur clé [6].

Beaucoup de travaux ont été effectués dans le domaine de la commande d'éoliennes à vitesse variable. L'objectif principal de la commande d'une éolienne, à vents faibles, est d'extraire le maximum d'énergie du vent en faisant tourner l'éolienne à une vitesse proportionnelle à la vitesse du vent fictif. Celle-ci étant difficile à mesurer, de nombreux travaux antérieurs proposés dans la littérature pour cette zone de fonctionnement font plusieurs types d'hypothèses pour pallier cet inconvénient : ils utilisent des modèles linéarisés qui considèrent l'entrée en vent comme une perturbation [7], [8], [9], ou bien ils supposent que l'éolienne est déjà en régime établi sur sa courbe de rendement optimal [10], [11], ou encore ils supposent que la vitesse du vent fictif est mesurable [12]. De plus, ces travaux ne traitent pas du rejet de perturbations. La forte turbulence du vent rend alors ces hypothèses intenable et les performances des commandes correspondantes sont faibles, particulièrement en termes de rendement électrique. En outre, dans la plupart de ces travaux, la vitesse du vent est supposée mesurable. Cependant, comme la vitesse du vent varie le long du disque balayé par le rotor, la mesure donnée par un anémomètre est celle de la vitesse du vent en un seul point de cette aire. Il est donc impossible de déterminer la vitesse du vent moyenne soufflant sur le rotor par cette mesure.

L'objectif de ce travail est de synthétiser des correcteurs qui prennent en compte la nature non linéaire de l'aérodynamique de l'éolienne, sa structure flexible, la nature turbulente du vent sans toutefois que ce dernier soit mesurable. Nous proposons alors d'estimer la vitesse du vent en utilisant l'éolienne elle-même comme dispositif de mesure.

Ce papier est organisé comme suit : Le modèle non linéaire à deux masses de l'éolienne est décrit dans la Section II puis mis sous forme d'état. La Section III rappelle les objectifs de la commande d'une EVV en dessous de la puissance nominale. Quelques techniques de commande déjà existantes sont adaptées au modèle à deux masses et sont également présentées dans cette Section. L'estimateur de la vitesse du vent est présenté dans la Section IV. Dans la Section V, deux correcteurs non linéaires sont synthétisés à partir du modèle à deux masses : L'un par retour d'état

statique et l'autre par retour d'état dynamique. Ces correcteurs sont alors combinés avec l'estimateur présenté dans la section précédente et font l'objet de tests sur le modèle mathématique dans la Section VI. Les résultats obtenus montrent de meilleures performances particulièrement en présence de perturbations et de bruit de mesure.

II. MODÉLISATION DE L'ÉOLIENNE

La puissance aérodynamique capturée par le rotor est donnée par

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (1)$$

Le coefficient de puissance C_p dépend de l'angle de calage β et de la vitesse spécifique λ qui est définie comme suit

$$\lambda = \frac{\omega_t R}{v} \quad (2)$$

où ω_t est la vitesse du rotor R est le rayon du rotor et ρ la densité de l'air.

La puissance aérodynamique peut être également écrite

$$P_a = \omega_t T_a \quad (3)$$

Le couple aérodynamique T_a est alors donné par

$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_q(\lambda, \beta) v^2 \quad (4)$$

où

$$C_q(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (5)$$

est le coefficient de couple.

La courbe du coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ est donnée sur la Figure. 1(a). Elle est obtenue grâce à la théorie de l'élément de pale, implémentée par un code d'évaluation de performance d'éoliennes appelé WT-PERF [13], développé par NREL¹. La dynamique du rotor entraîné à une vitesse ω_t par le couple aérodynamique T_a est donnée par

$$J_r \dot{\omega}_t = T_a - T_{ls} - K_r \omega_t \quad (6)$$

Le couple de l'arbre lent T_{ls} agit comme un couple de freinage sur le rotor. Il résulte des efforts de torsion et de frottements due à la différence entre ω_t et ω_{ls}

$$T_{ls} = B_{ls}(\theta_t - \theta_{ls}) + K_{ls}(\omega_t - \omega_{ls}) \quad (7)$$

La génératrice est entraînée par le couple de l'arbre rapide T_{hs} et freinée par le couple électromagnétique qu'elle développe T_{em} .

$$J_g \dot{\omega}_g = T_{hs} - K_g \omega_g - T_{em} \quad (8)$$

Le couple et la vitesse de cet arbre sont transmis via le multiplicateur de vitesse de rapport n_g . Pour un multiplicateur idéal, on a

$$n_g = \frac{T_{ls}}{T_{hs}} = \frac{\omega_g}{\omega_{ls}} = \frac{\theta_g}{\theta_{ls}} \quad (9)$$

1. NREL (National Renewable Energy Laboratory), Golden, CO.

En introduisant la dérivée de T_{ls} donné par (7), et à partir des relations (6), (8) et (9), on obtient le système d'équations suivant

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_t \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{T}_{ls} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ T_{ls} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \end{bmatrix} T_a + \begin{bmatrix} b_{12} \\ b_{22} \\ b_{32} \end{bmatrix} T_{em} \quad (10)$$

avec

$$\begin{aligned} a_{11} &= -\frac{K_r}{J_r} & ; & \quad a_{12} = 0 & ; & \quad a_{13} = -\frac{1}{J_r} \\ a_{21} &= 0 & ; & \quad a_{22} = -\frac{K_g}{J_g} & ; & \quad a_{23} = \frac{1}{n_g J_g} \end{aligned}$$

$$a_{31} = \left(B_{ls} - \frac{K_{ls} K_r}{J_r} \right) & ; & \quad a_{32} = \frac{1}{n_g} \left(\frac{K_{ls} K_r}{J_g} - B_{ls} \right)$$

$$a_{33} = -K_{ls} \left(\frac{J_r + n_g^2 J_g}{n_g^2 J_g J_r} \right)$$

et

$$\begin{aligned} b_{11} &= \frac{1}{J_r} & ; & \quad b_{12} = 0 \\ b_{21} &= 0 & ; & \quad b_{22} = -\frac{1}{J_g} \\ b_{31} &= \frac{K_{ls}}{J_r} & ; & \quad b_{32} = \frac{K_{ls}}{n_g J_g} \end{aligned}$$

L'utilisation du modèle à deux masses pour la synthèse des correcteurs est justifiée par le fait que les lois de commande que nous avons élaborées à partir de celui-ci sont plus générales et peuvent être appliquées aux éoliennes de toutes tailles. Particulièrement, ces lois de commandes sont plus adaptées aux éoliennes à forte flexibilité qui ne peuvent être convenablement modélisées avec un modèle à une masse [14].

III. FORMULATION DU PROBLÈME

A. Objectifs de la commande

On distingue deux régions dans le domaine de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable : en dessous et au dessus de la vitesse nominale du vent.

En dessous de la puissance nominale, la commande a pour principaux objectifs de :

1. Maximiser l'énergie capturée du vent.
2. Minimiser les efforts subis par le dispositif d'entraînement.

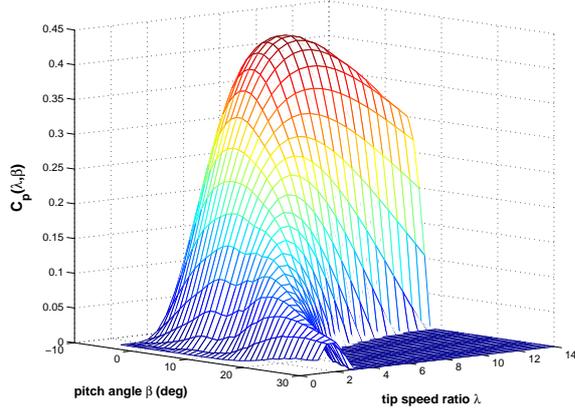
La courbe du coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ possède un seul maximum qui correspond à une capture optimale de la puissance du vent (figure 1(a)).

$$C_p(\lambda_{opt}, \beta_{opt}) = C_{p_{opt}} \quad (11)$$

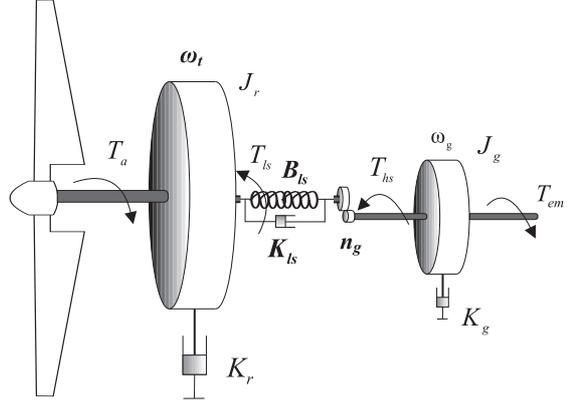
où

$$\lambda_{opt} = \frac{\omega_{opt} R}{v} \quad (12)$$

Par conséquent, pour un fonctionnement à charge partielle, pour maximiser l'extraction de l'énergie du vent, l'angle de calage β est fixé à sa valeur optimale β_{opt} et dans le but de maintenir λ à sa valeur optimale, la vitesse du rotor



(a) Courbe de $C_p(\lambda, \beta)$.



(b) Modèle à deux masses de l'aéroturbine.

Fig. 1. Caractéristiques aérodynamiques et mécaniques de l'éolienne.

doit être ajustée pour poursuivre la référence optimale $\omega_{t_{opt}}$ donnée par sont des constantes On peut remarquer que cette référence a le même profil que la vitesse du vent car elles sont proportionnelles.

Le but du contrôleur est de poursuivre la vitesse optimale du rotor $\omega_{t_{opt}}$ tout en essayant de réduire les efforts de commande.

B. Commandes classiques

Afin de dresser un tableau de comparaison de différentes stratégies de commande, tout d'abord, nous présentons brièvement deux commandes fréquemment rencontrées dans la littérature que nous avons adaptées au modèle à deux masses.

B.1 Commande par retour du couple aérodynamique

Dans [15], une commande par retour du couple aérodynamique (CRCA) est utilisée. Nous avons adapté cette commande au modèle à deux masses. L'état étendu $[\hat{\omega}_t \ \hat{\omega}_g \ \hat{T}_{ls} \ \hat{T}_a]^T$ est alors estimé avec un filtre de Kalman. Le couple aérodynamique estimé est réintroduit dans le couple de référence de la génératrice. Par la suite, une action proportionnelle est utilisée et mène à la commande suivante

$$T_{em} = \frac{1}{n_g} \hat{T}_a - \left(\frac{K_r}{n_g^2} + K_g \right) \hat{\omega}_g - \frac{K_c}{n_g^2} (\omega_{g_{ref}} - \hat{\omega}_g) \quad (13)$$

avec

$$\omega_{g_{ref}} = n_g k_\omega \sqrt{\hat{T}_a} \quad \text{et} \quad k_\omega = \frac{1}{\sqrt{k_{opt}}} = \sqrt{\frac{2\lambda_{opt}^3}{\rho\pi R^5 C_{p_{opt}}}}$$

Cependant, cette commande présente l'inconvénient de la présence d'une erreur statique. Un autre inconvénient de cette technique est qu'elle considère l'éolienne en régime permanent avec une vitesse de rotation optimale. On suppose alors que la vitesse du vent est constante or la forte turbulence du vent rend cette hypothèse intenable.

B.2 Commande indirecte en vitesse

Dans [16], il est montré qu'une éolienne est stable autour des points de la courbe de rendement aérodynamique optimal. Il est alors possible de maintenir T_a sur cette courbe par un choix convenable de T_{em} . Pour un modèle à deux masses de l'aéroturbine, cette valeur du couple électromagnétique est donnée par [17].

$$T_{em} = k_{opt_{hs}} \omega_g^2 - K_{t_{hs}} \omega_g \quad (14)$$

où

$$k_{opt_{hs}} = \frac{k_{opt}}{n_g^3} = \frac{1}{2} \rho \pi \frac{R^5}{n_g^3 \lambda_{opt}^3} C_{p_{opt}} \quad (15)$$

et

$$K_{t_{hs}} = \left(K_g + \frac{K_r}{n_g^2} \right).$$

$K_{t_{hs}}$ est le coefficient de frottements visqueux de la turbine ramené du coté de l'arbre rapide (génératrice).

Cette méthode est connue dans la littérature comme la commande indirecte en vitesse (CIV).

Avec ces deux méthodes, les transitions induites par les variations rapides de la vitesse du vent sont suivies par des pertes de puissance. En résumé, elles présentent deux inconvénients majeurs : D'une part, elles ne prennent pas en compte l'aspect dynamique du vent et de l'éolienne, d'autre part, elles ne sont pas robustes aux bruits de mesure et aux perturbations.

Dans le but de combler ces inconvénients, une commande non linéaire par retour d'état dynamique du modèle à deux masses est proposée. Elle utilise un estimateur de la vitesse du vent qui permet de prendre en considération son aspect turbulent. Cete structure de commande permet également le rejet de perturbations agissant sur la commande T_{em} .

IV. ESTIMATION DE LA VITESSE DU VENT

La vitesse du vent qui apparaît dans les équations aérodynamiques de l'éolienne est une grandeur fictive et donc non mesurable. Comme il est crucial de connaître cette valeur pour déduire la vitesse de référence $\omega_{t_{opt}}$, nous avons développé un estimateur de la vitesse du vent en

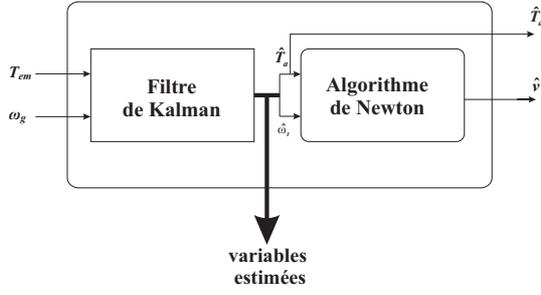


Fig. 2. Estimateur du couple aérodynamique et de la vitesse du vent

utilisant l'éolienne elle même comme dispositif de mesure. Comme indiqué sur la figure 2, l'estimateur est constitué de deux blocs :

- un premier bloc qui permet d'estimer, à partir de la mesure de la vitesse de la génératrice ω_g et du couple de commande T_{em} , le couple aérodynamique \hat{T}_a , de la vitesse du rotor $\hat{\omega}_t$ et de la génératrice $\hat{\omega}_g$.
- un deuxième bloc ayant pour entrées les estimées \hat{T}_a et $\hat{\omega}_t$ du couple et de la vitesse de rotation. La sortie est l'estimation de la vitesse du vent fictif \hat{v} .

L'estimation de v passe d'abord par celle de T_a dont l'estimée, ainsi que celles des autres variables du système sont obtenues par un filtrage de Kalman.

A. Estimation du couple aérodynamique

Avec le couple aérodynamique comme un état supplémentaire, la représentation d'état étendue est donnée par les équations (17) et (18) ξ est le bruit d'état et ν le bruit de mesure.

Seule la vitesse de la génératrice, qui est bruitée, est ici supposée accessible. Généralement, les bruits d'état et de mesure sont supposés stationnaires, la matrice de gain du filtre de Kalman peut donc être calculée hors-ligne. Le filtre de Kalman considéré dans cette étude est invariant bien que la variance du couple aérodynamique change au cours du temps.

B. Calcul de la vitesse du vent

La valeur de l'estimée de la vitesse du vent \hat{v} est reliée à celle de \hat{T}_a par l'équation suivante

$$\hat{T}_a - \frac{1}{2}\rho\pi R^3 C_q \left(\frac{\hat{\omega}_t R}{\hat{v}} \right) \hat{v}^2 = 0 \quad (19)$$

$C_q(\hat{\lambda}) = C_q(\hat{\lambda}, \beta_{opt})$ est une fonction tabulée de $\hat{\lambda}$. Afin d'utiliser une méthode numérique pour la résolution de l'équation (19) par rapport à \hat{v} , elle a été approximée par un polynôme en λ

$$C_q(\lambda) = \sum_{i=0}^n \alpha_i \lambda^i \quad (20)$$

L'algorithme de Newton-Raphson explicité en Annexe est alors utilisé pour le calcul de \hat{v} . Cette valeur est alors utilisée pour déduire $\hat{\omega}_{t_{opt}} = \frac{\lambda_{opt} \hat{v}}{R}$

V. COMMANDE NON LINÉAIRE AVEC ESTIMATEUR

A. Commande non linéaire par retour d'état statique

A partir de l'expression de $\dot{\omega}_t$

$$\dot{\omega}_t = \frac{1}{J_r} T_a - \frac{K_r}{J_r} \omega_t - \frac{1}{J_r} T_{ls} \quad (21)$$

On peut déduire l'expression de la dérivée seconde $\ddot{\omega}_t$ de la vitesse du rotor

$$\ddot{\omega}_t = \frac{1}{J_r} \dot{T}_a - \frac{K_r}{J_r} \dot{\omega}_t - \frac{1}{J_r} \dot{T}_{ls} \quad (22)$$

On peut également extraire \dot{T}_{ls} de (10)

$$\dot{T}_{ls} = a_{31}\omega_t + a_{32}\omega_g + a_{33}T_{ls} + b_{31}T_a + b_{32}T_{em} \quad (23)$$

En remplaçant (21) et (23) dans (22), cette dernière devient

$$\begin{aligned} \ddot{\omega}_t = & \frac{\dot{T}_a}{J_r} - \frac{(K_r + b_{31}J_r)}{J_r^2} T_a + \frac{(K_r^2 - a_{31}J_r)}{J_r^2} \omega_t \\ & - \frac{a_{32}}{J_r} \omega_g + \frac{(K_r - a_{33}J_r)}{J_r^2} T_{ls} - \frac{b_{32}}{J_r} T_{em} . \end{aligned} \quad (24)$$

Soit ε_ω l'erreur de poursuite définie par

$$\varepsilon_\omega = \omega_{t_{opt}} - \omega_t \quad (25)$$

On désire imposer à l'erreur ε_ω une dynamique du second ordre définie par

$$\ddot{\varepsilon}_\omega + b_1 \dot{\varepsilon}_\omega + b_0 \varepsilon_\omega = 0 \quad (26)$$

b_0 et b_1 sont choisis tels que le polynôme $s^2 + b_1 s + b_0$ soit Hurwitz.

En remplaçant $\dot{\omega}_t$ donnée par (21) et $\ddot{\omega}_t$ donnée par (24), et en substituant aux variables leurs estimées, on aboutit à l'expression suivante de la commande

$$\begin{aligned} T_{em} = & A_1 \hat{\omega}_t + A_2 \hat{\omega}_g + A_3 \hat{T}_{ls} + A_4 \hat{T}_a + A_5 \dot{\hat{T}}_a \\ & + A_6 (\ddot{\hat{\omega}}_{t_{opt}} + b_1 \dot{\hat{\omega}}_{t_{opt}} + b_0 \hat{\omega}_{t_{opt}}) . \end{aligned} \quad (27)$$

avec

$$\begin{aligned} A_1 = & \frac{(b_0 J_r^2 - b_1 K_r J_r - a_{31} J_r + K_r^2)}{b_{32} J_r} ; & A_2 = & \frac{-a_{32}}{b_{32}} \\ A_3 = & \frac{(K_r - b_1 J_r - a_{33} J_r)}{b_{32} J_r} ; & A_4 = & \frac{(b_1 J_r - b_{31} J_r - K_r)}{b_{32} J_r} \\ A_5 = & \frac{1}{b_{32}} ; & A_6 = & \frac{-J_r}{b_{32}} \end{aligned}$$

B. Commande non linéaire par retour d'état dynamique

Afin de rejeter l'effet d'une perturbation additive constante sur la commande, on impose une dynamique du troisième ordre à l'erreur de poursuite

$$\overset{(3)}{\varepsilon}_\omega + b_2 \ddot{\varepsilon}_\omega + b_1 \dot{\varepsilon}_\omega + b_0 \varepsilon_\omega = 0 \quad (28)$$

b_0 , b_1 et b_2 sont choisis tels que le polynôme $s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0$ soit Hurwitz.

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_t \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{T}_{ls} \\ \dot{T}_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_r}{J_r} & 0 & -\frac{1}{J_r} & \frac{1}{J_r} \\ 0 & -\frac{K_g}{J_g} & \frac{1}{n_g J_g} & 0 \\ (B_{ls} - \frac{K_{ls} K_r}{J_r}) & \frac{1}{n_g} (\frac{K_{ls} K_g}{J_g} - B_{ls}) & -K_{ls} (\frac{J_r + n_g^2 J_g}{n_g^2 J_g J_r}) & \frac{K_{ls}}{J_r} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ T_{ls} \\ T_a \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J_g} \\ \frac{K_{ls}}{n_g J_g} \\ 0 \end{bmatrix} T_{em} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \xi \end{bmatrix}$$

$$y = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ T_{ls} \\ T_a \end{bmatrix} + \nu. \quad (18)$$

A partir de l'expression (24) de $\dot{\omega}_t$, en la dérivant par rapport au temps, et en prenant compte des expressions (21) de $\dot{\omega}_t$ et (23) de \dot{T}_{ls} , on parvient à l'expression suivante de $\omega_t^{(3)}$

$$\omega_t^{(3)} = B_1 \omega_t + B_2 \omega_g + B_3 T_{ls} + B_4 T_a + B_5 \dot{T}_a + B_6 \ddot{T}_a + B_7 T_{em} + B_8 \dot{T}_{em} \quad (29)$$

avec

$$B_1 = \frac{[a_{31} J_r (K_r - a_{33} J_r) - K_r (K_r^2 - a_{31} J_r)]}{J_r^3}$$

$$B_2 = \frac{a_{32} [K_g J_r + J_g (K_r - a_{33} J_r)]}{J_r^2 J_g}$$

$$B_3 = \frac{[n_g J_g J_r a_{33} (K_r - a_{33} J_r) - a_{32} J_r^2 - n_g J_g (K_r^2 - a_{31} J_r)]}{n_g J_g J_r^3}$$

$$B_4 = \frac{[b_{31} J_r (K_r - a_{33} J_r) + (K_r^2 - a_{31} J_r)]}{J_r^3}$$

$$B_5 = -\frac{(K_r + b_{31} J_r)}{J_r^2} \quad ; \quad B_6 = \frac{1}{J_r}$$

$$B_7 = \frac{b_{32} J_g (K_r - a_{33} J_r) + a_{32} J_r}{J_r^2 J_g} \quad ; \quad B_8 = -\frac{b_{32}}{J_r}$$

En substituant cette expression dans (28) ainsi que celles de $\dot{\omega}_t$ et $\ddot{\omega}_t$ données respectivement par (21) et (24), la dynamique de la commande est

$$\dot{T}_{em} = C_1 \ddot{T}_a + C_2 \dot{T}_a + C_3 \hat{T}_a + C_4 \hat{\omega}_t + C_5 \hat{\omega}_g + C_6 \hat{T}_{ls} + C_7 T_{em} + C_8 (\ddot{\omega}_{t_{opt}} + b_2 \dot{\omega}_{t_{opt}} + b_0 \omega_{t_{opt}}). \quad (30)$$

Les coefficients C_i sont donnés par l'équation (31). Pour faire un compromis entre l'optimisation de la capture de l'énergie du vent et la réduction des efforts de commande, nous avons adopté les moyens suivants :

- choix d'une dynamique qui permet de suivre la tendance moyenne de la vitesse du vent, sur un intervalle de temps donné, tout en évitant la poursuite des fluctuations locales à forte turbulence,

TABLE I
CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉOLIENNE CART

Diamètre du rotor	43.3 m
Rapport de transmission	43.165
Hauteur de la tour	36.6 m
Puissance nominale	650 kW
Couple maximal du générateur	162/n _g kN.m

- filtrage du couple T_{em} par un passe-bas pour lisser la commande, on soulage ainsi le dispositif d'entraînement des efforts importants et à fluctuations rapides,
- filtrage de la vitesse de référence $\omega_{t_{opt}}$ et ses dérivées pour obtenir un signal moins turbulent.

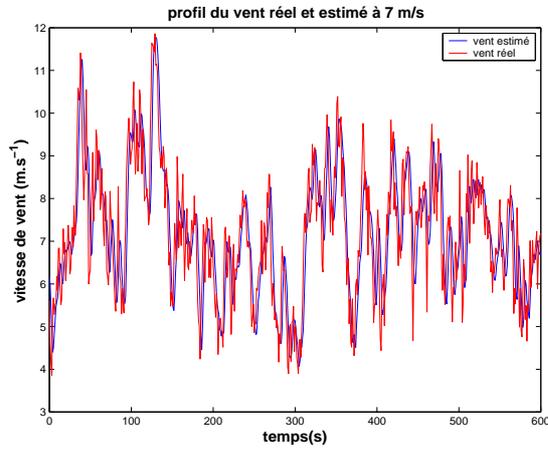
VI. RÉSULTATS DE VALIDATION

Les simulations numériques ont été effectuées avec les paramètres de l'éolienne CART (Controls Advanced Research Turbine) implantée sur le site de NREL dans le Colorado. CART est une éolienne bipale à vitesse variable et calage variable. L'arbre rapide entraîne une génératrice asynchrone reliée au réseau par un dispositif d'électronique de puissance. Les caractéristiques de cette éolienne sont données dans le tableau I. Dans le but d'effectuer une comparaison des techniques de commande que nous proposons, toutes les simulations ont été réalisées dans les mêmes conditions de fonctionnement, soit :

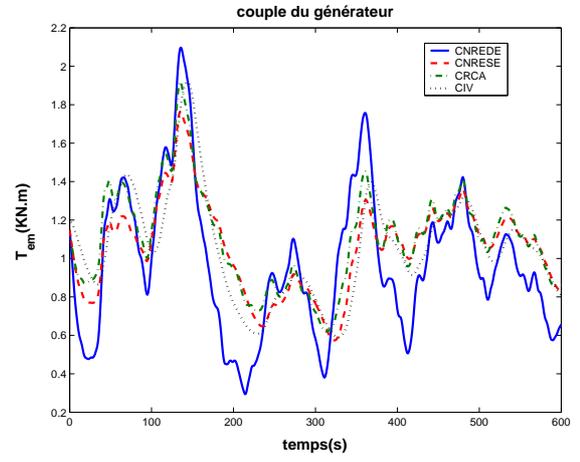
- présence d'une perturbation additive constante d de valeur 10/n_g kN.m ($n_g = 43.165$),
- présence d'un bruit de mesure additif sur ω_g avec un RSB qui avoisine 7 dB,
- un profil de vent d'une vitesse moyenne de 7 m/s, d'une durée de 10 mn et d'une turbulence d'intensité I=25.00 % (figure 3).

Les commandes proposées ont été testées avec le modèle mathématique à deux masses. Afin de souligner les commandes les plus performantes, on a dressé un tableau de

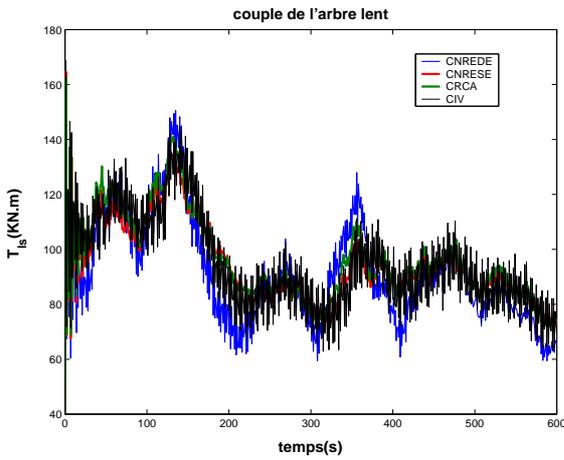
$$\begin{aligned}
C_1 &= \frac{1}{b_{32}} \\
C_2 &= -\frac{(K_r + (b_{31} - b_2)J_r)}{b_{32}J_r} \\
C_3 &= -\frac{[b_2J_r(K_r + b_{31}J_r) - b_1J_r^2 - b_{31}J_r(K_r - a_{33}J_r) - K_r^2 + a_{31}J_r]}{b_{32}J_r^2} \\
C_4 &= -\frac{[K_r(K_r^2 - a_{31}J_r) - b_2J_r(K_r^2 - J_r a_{31}) + b_1K_rJ_r^2 - b_0J_r^3 - a_{31}J_r(K_r - a_{33}J_r)]}{b_{32}J_r^2} \\
C_5 &= -\frac{a_{32}[J_rJ_g - K_gJ_r - J_g(K_r - a_{33}J_r)]}{b_{32}J_rJ_g} \\
C_6 &= -\frac{b_1n_gJ_gJ_r^2 - n_gJ_gJ_r a_{33}(K_r - a_{33}J_r) + a_{32}J_r^2 + n_gJ_g(K_r^2 - a_{31}J_r) - b_2n_gJ_gJ_r(K_r - a_{33}J_r)}{b_{32}n_gJ_gJ_r^2} \\
C_7 &= -\frac{b_3b_2J_rJ_g - b_{32}J_g(K_r - a_{33}J_r) - a_{32}J_r}{b_{32}J_gJ_r} \\
C_8 &= -\frac{J_r}{b_{32}}.
\end{aligned} \tag{31}$$



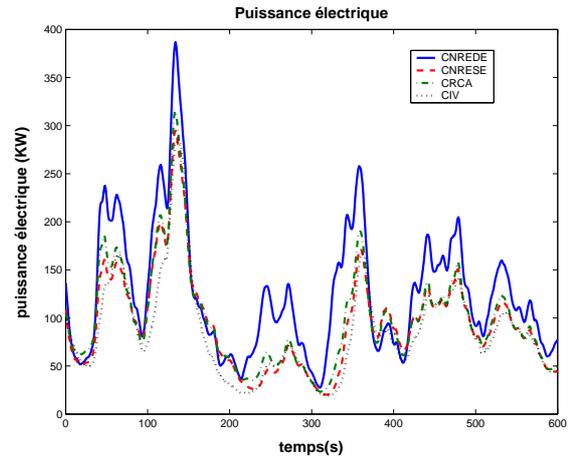
(a) estimée de la vitesse du vent v



(b) couple de commande T_{em}



(c) couple de l'arbre lent T_{l_s}



(d) puissance électrique P_e

Fig. 4. Comparaison des différentes stratégies de commande en présence de bruit de mesure et de perturbation.

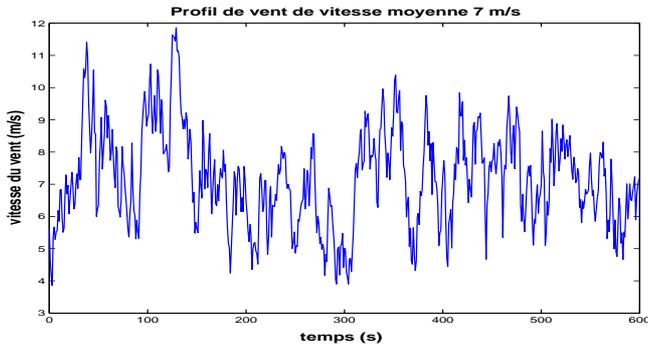


Fig. 3. Profil de vent de vitesse moyenne 7 m.s^{-1} .

TABLE II
COMPARAISON DES DIFFÉRENTES STRATÉGIES DE COMMANDE DU
MODÈLE À DEUX MASSES

	CIV	CRCA	CNRESE	CNREDE
$\text{std}(T_{l_s})$ (kN.m)	17.855	15.601	14.420	19.317
$\text{max}(T_{l_s})$ (kN.m)	168.69	162.42	164.72	164.00
$\text{std}(T_{em})$ (kN.m)	0.278	0.253	0.240	0.373
$\text{max}(T_{em})$ (kN.m)	1.918	1.921	1.764	2.097
$\eta_{\text{aéro}}$ (%)	85.70	86.89	88.06	94.69
$\eta_{\text{élec}}$ (%)	63.48	72.49	68.98	92.03

comparaison (tableau II). Pour une meilleure visibilité, les courbes du couple T_{em} , de celui de l'arbre lent T_{l_s} et de la puissance électrique sont rassemblées, pour chacune des commandes appliquées, sur un même graphique (figure 4).

D'après la courbe des puissances électriques 4(d), la puissance produite par l'éolienne en utilisant la stratégie de commande non linéaire par retour d'état dynamique, avec estimateur de la vitesse du vent (CNREDE), que nous avons proposée montre des performances nettement supérieures.

En effet, comme on peut le remarquer, les autres stratégies de commande ne rejettent pas l'effet de la perturbation. De plus, quand la vitesse du vent subit des variations rapides (aux instants 50, 120 et 350 s par exemple), c'est la CNREDE qui répond le mieux à cette variation. Ceci prouve bien le fait que c'est cette technique qui prend mieux en compte l'aspect dynamique du vent grâce à l'utilisation de son estimation. En effet, comme il est montré sur la figure 4(a), l'estimateur donne de bons résultats pour l'estimée v malgré la présence de bruits de mesure. Cette observation est confirmée par les résultats du tableau II où la CNREDE conduit aux meilleures performances en termes de rendement aérodynamique et électrique. On peut noter que l'écart entre les rendements aérodynamiques de la commande indirecte en vitesse (CIV) et la CNREDE, est de 9%.

En termes d'efforts de commande représentés sur la figure 4(b), la valeur maximale de T_{em} est d'environ 2 kN.m pour les différentes techniques, avec un minimum de 1.8 kN.m environ pour la CNRESE. L'écart-type de T_{em} est sensiblement le même dans tous les cas, soit près de 0.25 kN.m, à l'exception de la CNREDE où il atteint

0.37 kN.m, certainement dû à une meilleure prise en compte de cet aspect dynamique du vent.

Pour les efforts subis par le dispositif d'entraînement, représentés par le couple de l'arbre lent T_{l_s} , c'est avec la CIV que cette grandeur atteint sa plus grande valeur à près de 169 kN.m. La valeur la moins élevée des maxima correspond à la commande par retour du couple aérodynamique (CRCA) avec 162.5 kN.m. Pour la CNREDE, le maximum de T_{l_s} atteint 164 kN.m. Bien que celle-ci assure de loin les meilleures performances en termes de rendement, le couple de l'arbre lent correspondant reste dans le même ordre de grandeurs (figure 4(c)).

Toutefois, l'écart-type du couple de l'arbre lent T_{l_s} est légèrement supérieur pour la CNREDE, comme pour l'effort de commande T_{em} , ce qui s'explique par la nécessité d'efforts supplémentaires pour le rejet de la perturbation et la prise en compte de l'aspect dynamique du vent.

VII. CONCLUSION

Dans le but d'optimiser la capture de la puissance du vent à partir d'un modèle à deux masses de l'éolienne, les commandes classiques CIV et CRCA ont été adaptées à ce modèle. Néanmoins, elles présentent de faibles performances, particulièrement en présence d'une perturbation sur la commande et d'un bruit de mesure.

Une commande non linéaire par retour d'état dynamique avec estimateur est alors proposée. L'estimateur développé permet l'estimation du couple aérodynamique et de la vitesse du vent ainsi que toutes les autres variables du modèle à deux masses, à partir de mesures bruitées. La commande non linéaire que nous avons proposée, par retour d'état dynamique avec estimateur de la vitesse du vent, assure les meilleures performances, en termes de rendement avec des efforts de commande et des charges transitoires acceptables. La prise en compte de l'aspect dynamique de l'éolienne, de la non-linéarité de son comportement aérodynamique et de la nature turbulente du vent, conjointement avec le fait de l'utilisation d'un estimateur d'une part et le rejet de l'effet de la perturbation d'autre part ont conduit à atteindre l'objectif visé.

APPENDICES

I. ALGORITHME D'ESTIMATION DE LA VITESSE DU VENT

Pour un instant t , la vitesse de vent effective $\hat{v}(t)$ est obtenue par l'algorithme de Newton à partir de l'estimée du couple aérodynamique $\hat{T}_a(t)$ de la vitesse du rotor $\hat{\omega}_t$ donnés par le filtre de Kalman décrit dans la section IV. La forme itérative de l'algorithme est donnée par

1. $v_0 = \hat{v}(t - T_s)$; $n=0$;
2. $\bar{v}_{n+1} = \bar{v}_n - H_n^{-1} g_n$
3. $n := n + 1$
4. arrêter si $(n > n_{max})$ ou $(\frac{|\bar{v}_n - \bar{v}_{(n-1)}|}{\bar{v}_n} < \varepsilon_{min})$ sinon revenir à l'étape 2
5. $n_f := n$; $\hat{v}(t) = \bar{v}_{n_f}$

où \bar{v}_n est le résultat des n itérations, T_s est la période d'échantillonnage fixée ici à 1 s.

g_n et H_n sont données par les expressions suivantes

$$g_n = I(t, v)|_{\bar{v}_n} = \hat{T}_a(t) - \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_q(\bar{\lambda}_n) \bar{v}_n^2 \quad (19)$$

$$H_n = -\rho \pi R^3 C_q(\bar{\lambda}_n) \bar{v}_n + \frac{1}{2} \rho \pi R^4 \hat{\omega}_t \frac{\partial C_q(\bar{\lambda}_n)}{\partial \lambda} \quad (20)$$

avec

$$\bar{\lambda}_n = \frac{\hat{\omega}_t R}{\bar{v}_n} .$$

RÉFÉRENCES

- [1] C. Millais. An overview of wind power in europe. *International Power & Utilities Finance Review 2005/2006*, 9 :40–44, April 2005.
- [2] J. F. Manwell, J.G. McGowan, et A.L. Rogers. *Wind Energy Explained : Theory, Design and Applications*. John Wiley & Sons, 2002.
- [3] P. W. Carlin, A. S. Laxson, et E. B. Muljadi. The history and state of the art of variable-speed wind turbine technology. *WIND ENERGY*, 6(2) :129–159, apr 2003.
- [4] J. Ernst et W. Leonhard. Optimisation of wind energy output of variable speed wind turbines. *Wind Power 85*, San Francisco, CA, 1985.
- [5] F. D. Bianchi, H. De Battista, et R. J. Mantz. *Wind Turbine Control Systems : Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*. Springer, 2nd edition, 2006.
- [6] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, et E. Bossanyi. *Wind Energy Handbook*. John Wiley & Sons, 2001.
- [7] P. M. M Bongers. *Modeling and Identification of Flexible Wind Turbines and a Factorizational Approach to Robust Control*. PhD thesis, Delft University of Technology, June 1994.
- [8] T. Ekelund. *Modeling and Linear Quadratic Optimal Control of Wind Turbines*. PhD thesis, Chalmers University of Technology, Sweden, April 1997.
- [9] X. Ma. *Adaptive Extremum Control And Wind Turbine Control*. PhD thesis, Danemark, May 1997.
- [10] Y. D. Song, B. Dhinakaran, et X. Y. Bao. Variable speed control of wind turbines using nonlinear and adaptive algorithms. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85(3) :293–308, April 2000.
- [11] H. Vihriälä. *Control of Variable Speed Wind Turbines*. PhD thesis, Tampere University of technology, November 2002.
- [12] A. Mullane, G. Lightbody, R. Yacamini, et S. Grimes. Adaptive control of variable speed wind turbines. *36th Universities Power Engineering Conference*, Swansea, UK, 12-24th September 2001.
- [13] M. L. Buhl. *WT_PERF USER'S GUIDE*. National Wind Technology Center, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, 3.0 edition, August 2004.
- [14] B. Boukhezzar, H. Siguerdidjane, et M. Hand. Nonlinear control of variable-speed wind turbines for generator torque limiting and power optimization. *ASME Journal of Solar Energy Engineering*, 128(4) :516–530, November 2006.
- [15] H. Vihriälä, R. Perälä, P. Mäkilä, et L. Söderlund. A gearless wind power drive : Part 2 : Performance of control system. *European Wind Energy Conference*, volume 1, pages 1090–1093, 2001.
- [16] W. E Leithead et B. Connor. Control of variable speed wind turbines : design task. *International Journal of Control*, 73(13) :1189–1212, 2000.
- [17] B. Boukhezzar. *Sur les Stratégies de Commande pour l'Optimisation et la Régulation de Puissance des Eoliennes à Vitesse Variable*. PhD thesis, Université de Paris-Sud-Ecole Supérieure d'Electricité, février 2006.