
Régulations de puissance d'une éolienne

ENSEIGNEMENT D'INTEGRATION



Réalisé par le groupe no.2 :

Thomas IDIER

Baptiste BAUCHEZ

Paul-Aimery PREVERAUD DE VAUMAS

Thibault GELLÉ

17 novembre 2023

Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Contexte et objectif	1
1.2	Éléments de modélisation	1
2	Mise en équation du système et Linéarisation	2
2.1	Hypothèses	2
2.2	Mise en équation	2
2.3	Simulation du système non linéaire au point d'équilibre	3
2.4	Linéarisation autour du point d'équilibre	4
2.5	Comparaison des modèles	5
3	Asservissement du système	6
3.1	Correcteur PI	6
3.1.1	Etude du système linéarisé en boucle ouverte	6
3.1.2	Détermination des paramètres du correcteur PI	7
3.1.3	Résultat obtenu sur le système non linéaire corrigé	7
3.1.3.1	Modèle simulink	7
3.1.3.2	Résultats obtenues avec un vent constant	8
3.1.3.3	Résultats obtenues avec un vent variable	8
3.1.4	Robustesse du système linéaire corrigé	9
3.2	MPPT : Maximum Power Point Tracking	9
3.3	Correcteur par retour d'état	10
3.3.1	Modélisation globale : avec action intégrale	10
3.3.2	Correcteur par placement de pôle avec action intégrale	11
3.3.2.1	Choix des valeurs propres	11
3.3.2.2	Résultats obtenus	11
3.3.2.3	Avec une perturbation de vent	12
3.3.3	Correcteur LQI	12
3.3.3.1	Modélisation	12
3.3.3.2	Résultats obtenus	12
3.3.3.3	Avec une perturbation de vent	13
3.4	Comparaison des Correcteurs LQI et PI :	13
4	Consigne optimale du parc éolien	14
4.1	Modélisation	14
4.2	Comparaison des modèles	14
	Conclusion	14

Chapitre 1

Introduction

1.1 Contexte et objectif

L'objectif du projet consiste à élaborer un système de régulation de puissance pour une éolienne. Différentes stratégies de commande seront évaluées, et la plus performante sera retenue. La loi de commande résultante devra permettre de maximiser la puissance générée ou de la maintenir à un niveau inférieur. Une fois la loi de commande déterminée pour une éolienne, son fonctionnement sera analysé pour plusieurs éoliennes disposées en cascade.

Le projet vise donc à définir une stratégie de commande performante, puis de s'en servir pour implémenter la méthode classique de pilotage MPPT. Les performances seront mesurées pour une éolienne seule, puis pour 10 éoliennes en cascades.

1.2 Éléments de modélisation

Cette étude se focalise sur une éolienne de type CART, dont les coefficients de puissance sont préalablement connus et peuvent être approximés à l'aide de fonctions analytiques.

La modélisation d'une éolienne fait souvent appel à l'utilisation de systèmes masses-ressort traduisant en particulier les phénomènes de torsion de l'arbre comme sur la figure ci-dessous.

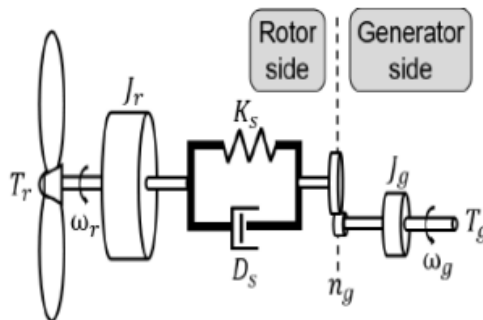


FIGURE 1.1 – Modèle à deux masses d'une éolienne

Chapitre 2

Mise en équation du système et Linéarisation

2.1 Hypothèses

On considèrera dans cette étude une éolienne de type CART dont les coefficients de puissance sont connus et peuvent être approché par des fonctions analytiques. On pourra faire plusieurs hypothèses simplificatrices.

- 1 - Vent en aval à vitesse constante v
- 2 - Dynamique des actionneurs négligée soit :

$$\tau\theta \ll 1 \Rightarrow \theta = \theta_r, \quad \tau T \ll 1 \Rightarrow T_g = T_{g_r}$$

- 3 - angle de calage θ fixé de manière à avoir un coefficient de puissance toujours positif.

On obtient de plus les données suivantes :

Parameter	Value	Units
R	21.65	m
n_g	43.165	—
K_s	269.1	kN · m/rad
D_s	9500	N · m/rad/s
J_r	$3.25 \cdot 10^5$	kg · m ²
J_g	34.4	kg · m ²
$\omega_{r,n}$	4.3982	rad/s
$\omega_{r,max}$	5.5501	rad/s
ϑ_{max}	30	deg
ϑ_{min}	−5	deg
$ \dot{\vartheta} _{max}$	19	deg/s
$T_{r,max}$	162	kN · m
$P_{e,n}$	600	kW

FIGURE 2.1 – Données du modèle CART

On fixe d'après les hypothèses $v = 7m/s$ (correspondant à environ la moyenne des vitesses mesurés dans l'enregistrement du profil de vent : wind7.mat) et $\theta = 5^\circ$ qui nous permet d'avoir une puissance performante pour une large plage de λ . De plus, on fixe la valeur de ω_r à sa valeur nominale, $\omega_{r,n} = 4.4rad/s$

2.2 Mise en équation

On s'appuie sur la mise en équation classique d'une éolienne CART donnée ci-dessous :

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_r \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{\delta} \\ \dot{\vartheta} \\ \dot{T}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_r} \frac{P_r(\omega_r, \vartheta, v)}{\omega_r} - \frac{D_s}{J_r} \omega_r + \frac{D_s}{J_r n_g} \omega_g - \frac{K_s}{J_r} \delta \\ \frac{D_s}{J_g n_g} \omega_r - \frac{D_s}{J_g n_g^2} \omega_g + \frac{K_s}{J_g n_g} \delta - \frac{1}{J_g} T_g \\ \omega_r - \frac{1}{n_g} \omega_g \\ -\frac{1}{\tau_\vartheta} \vartheta + \frac{1}{\tau_\vartheta} \vartheta_r \\ -\frac{1}{\tau_T} T_g + \frac{1}{\tau_T} T_{g,r} \end{bmatrix}$$

FIGURE 2.2 – Mise en équation

Or, d'après l'hypothèse (2), on a $\frac{d\theta}{dt} = 0$ et $\frac{dT_g}{dt} = 0$. D'après l'hypothèse (1) il reste donc 3 variables

à considérer. Le vecteur d'état prend alors la forme $X = \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_g \\ \delta \end{bmatrix}$ et $Y = P_e$. L'entrée est $U = \begin{bmatrix} \theta \\ T_g \end{bmatrix}$. La représentation d'état est la suivante :

$$\begin{cases} \dot{X} = f(X(t), U(t), v) \\ Y = h(X(t), U(t)) \end{cases}$$

$$\text{avec } f(X(t), U(t), v) = \begin{bmatrix} \frac{1}{J_r} \frac{P_r}{\omega_r} - \frac{D_s}{J_r} \omega_r + \frac{D_s}{J_r n_g} \omega_g - \frac{K_s}{J_r} \delta \\ \frac{D_s}{J_g n_g} \omega_r - \frac{D_s}{J_g n_g^2} \omega_g + \frac{K_s}{J_g n_g} \delta - \frac{1}{J_g} T_g \\ \omega_r - \frac{1}{n_g} \omega_g \end{bmatrix} \text{ et } h(X(t), U(t)) = \omega_g T_g$$

On cherche ensuite un point d'équilibre en régime permanent. A l'équilibre, on a $\frac{d\omega_r}{dt} = 0$, $\frac{d\omega_g}{dt} = 0$ et $\frac{d\delta}{dt} = 0$

On obtient donc le système suivant :

$$\begin{cases} 0 = \frac{1}{J_r} \frac{P_r}{\omega_r} - \frac{D_s}{J_r} \omega_r + \frac{D_s}{J_r n_g} \omega_g - \frac{K_s}{J_r} \delta \\ 0 = \frac{D_s}{J_g n_g} \omega_r - \frac{D_s}{J_g n_g^2} \omega_g + \frac{K_s}{J_g n_g} \delta - \frac{1}{J_g} T_g \\ 0 = \omega_r - \frac{1}{n_g} \omega_g \end{cases}$$

On résoud le système et obtient que :

$$\begin{cases} \omega_{g0} = 189.85 \text{ rad/s} \\ \delta_0 = 0.0609 \text{ rad} \\ T_{g0} = 379 \text{ N.m} \end{cases}$$

2.3 Simulation du système non linéaire au point d'équilibre

Une fois la représentation d'état mis sous la forme d'une fonction, on la met dans un bloc simulink et on obtient le schéma suivant :

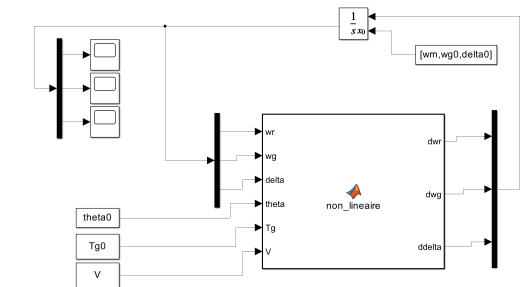


FIGURE 2.3 – Schéma simulink du système non linéaire

On met comme condition initiale les valeurs du point d'équilibre obtenues dans la section précédente, et on regarde si il y a une variation ou si cela reste bien constant au point d'équilibre. On obtient la courbe suivante :

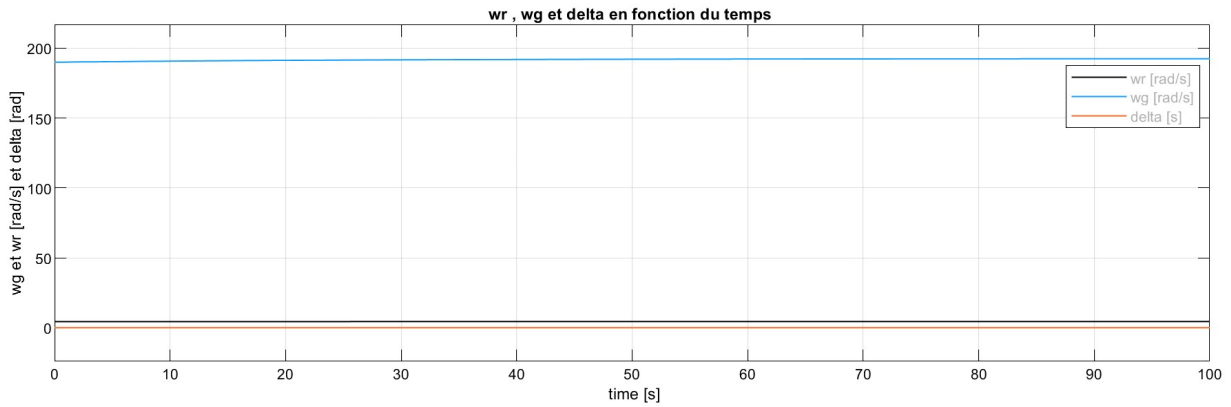


FIGURE 2.4 – Valeurs de ω_g , δ et T_g

On remarque bien que les valeurs restent quasiment constante. Il s'agit bien d'un point d'équilibre.

2.4 Linéarisation autour du point d'équilibre

Pour linéariser le système autour du point d'équilibre, nous avons utilisé la fonction `linemod`. La représentation d'état linéarisé est de la forme :

$$\begin{cases} \dot{X} = AX(t) + BU(t) \\ Y = CX(t) + DU(t) \end{cases}$$

En faisant tourner le programme, on obtient les matrices suivantes :

$$A = \begin{pmatrix} -0.0721 & 0.0007 & -0.8280 \\ 6.3978 & -0.1482 & 181.2273 \\ 1.0000 & -0.0232 & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} -0.0107 & 0 \\ 0 & -0.0291 \\ 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 379.6946 & 0 \end{pmatrix}, \quad D = \begin{pmatrix} 0 & 189.8483 \end{pmatrix}$$

2.5 Comparaison des modèles

On a comparé le modèle linéaire au modèle non linéaire en envoyant les échelons suivants :

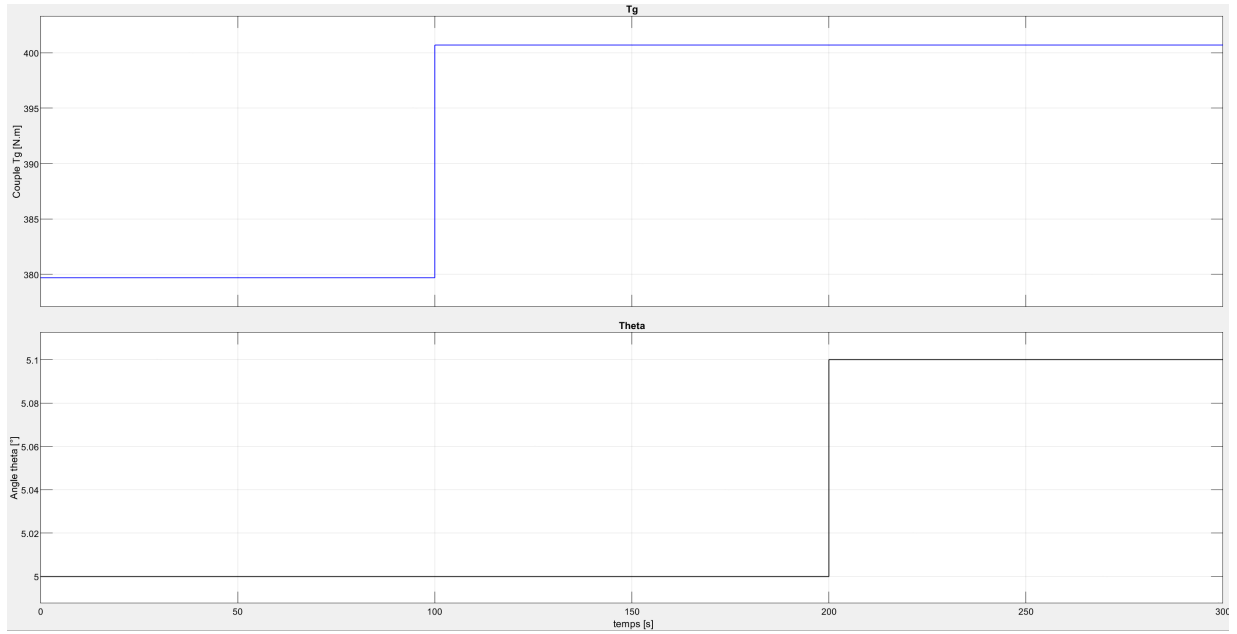


FIGURE 2.5 – Echelon de T_g et θ

On obtient les réponses suivantes de ω_r , ω_g et δ :

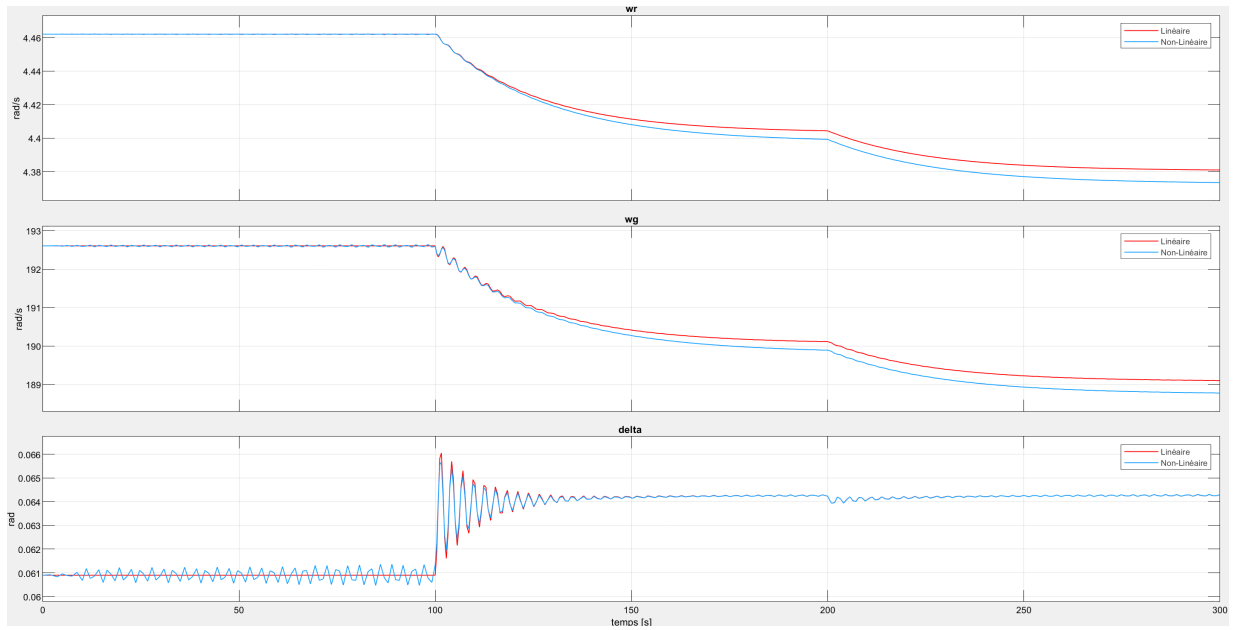


FIGURE 2.6 – Valeurs de ω_r , ω_g et δ

On constate que le modèle linéaire suit la dynamique du modèle non-linéaire correctement. Une différence de 0.2% en régime permanent s'observe pour ω_r et ω_g entre le modèle linéaire et le modèle non-linéaire.

Chapitre 3

Asservissement du système

3.1 Correcteur PI

3.1.1 Etude du système linéarisé en boucle ouverte

Pour corriger le système et avoir un aperçu des marges de gain et de phase, il est nécessaire de tracer les diagrammes de Bode en fonction des différentes entrées.

En utilisant la fonction bode de Matlab on obtient les courbes suivantes :

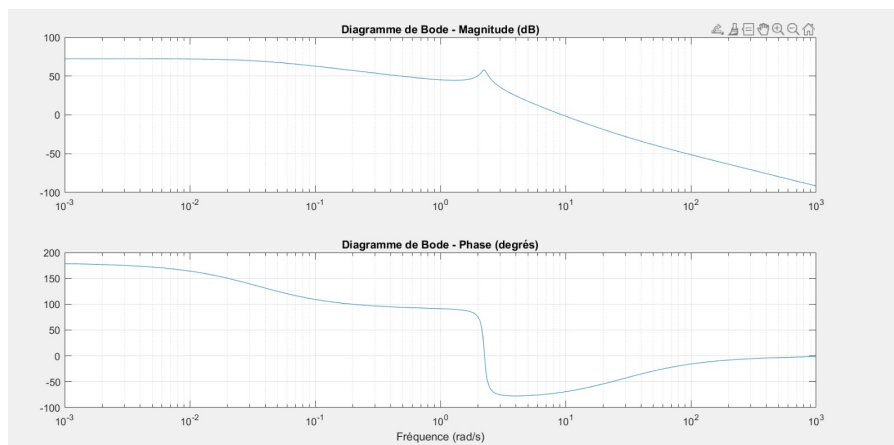


FIGURE 3.1 – Diagramme de Bode pour θ

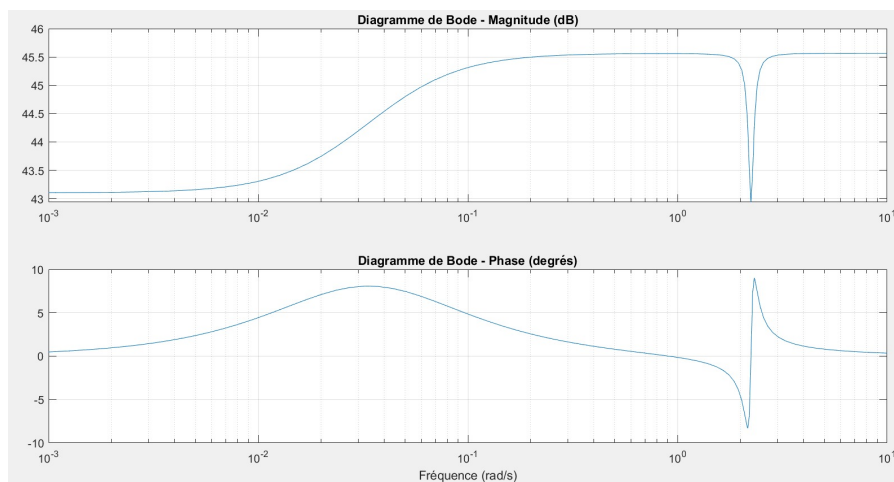


FIGURE 3.2 – Diagramme de Bode pour T_g

On remarque sur le diagramme de Bode de T_g qu'il y a une antirésonance rad/s suivi d'une résonance autour de 2,2 rad/s.

De plus, sur le diagramme de Bode de θ , on a une résonance à 2,2 rad/s.

D'autre part, on a des marges de gain et de phase assez grande pour les deux diagrammes de Bode. Pour θ on a une marge de gain infini, et une marge de phase d'environ 100°.

Dans la suite de l'étude, on a choisi d'avoir comme cahier des charges :

- un temps de réponse de 10 secondes
- un dépassement maximum de 10%
- une erreur statique nulle

3.1.2 Détermination des paramètres du correcteur PI

Dans cette section, on a fixé l'angle θ à 5°, et on corrige T_g .

Le correcteur PI est de la forme :

$$C(p) = K(1 + \frac{1}{T_i p})$$

Pour garantir la stabilité, il faut que la pulsation de coupure de la FTBO soit très grande devant la pulsation de coupure du correcteur, afin de se placer dans la zone où la phase du correcteur est nulle. C'est pourquoi on choisit de prendre $\omega_c = 0.25 \text{ rad/s}$.

Pour déterminer T_i , on utilise la relation :

$$\begin{aligned}\phi_{sys}(\omega_c) + \phi_{correcteur}(\omega_c) &= M_{phase} - 180 \\ \phi_{sys}(\omega_c) &= 5 \\ \phi_{correcteur}(\omega_c) &= \arctan(T_i \omega_c) - 90 \\ M_{phase} &= 115 \\ T_i &= \frac{1}{\omega_c} \tan(M_{phase} - \phi_{sys}(\omega_c) - 90)\end{aligned}$$

On a alors $T_i = 0.8 \text{ s}$, pour avoir une marge de phase de 115 à la pulsation ω_c . Cela permet de continuer à garantir la stabilité tout en permettant un bon effet intégrateur du correcteur.

Dans un second temps, la valeur de K s'obtient en ayant un gain de 0 dB en boucle fermée pour la valeur de ω_c .

Ainsi, on obtient $K = 0.0011$.

3.1.3 Résultat obtenu sur le système non linéaire corrigé

3.1.3.1 Modèle simulink

Une fois les paramètres du correcteur obtenu grâce au modèle linéaire, on modélise le correcteur sur simulink en utilisant le modèle non linéaire, puis on regarde si on vérifie bien les critères du cahier des charges.

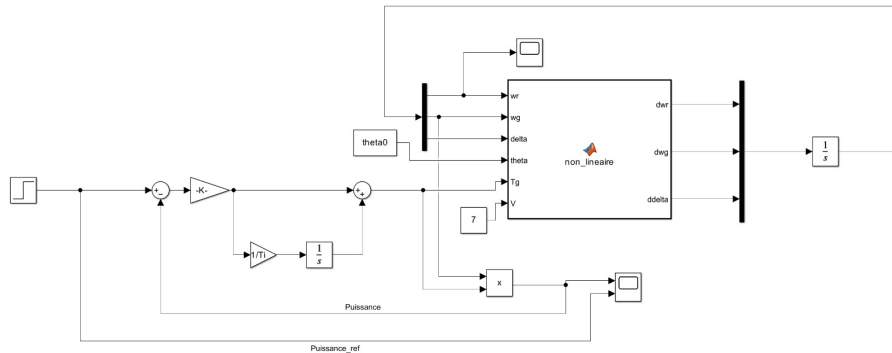


FIGURE 3.3 – Modèle Simulink avec correcteur PI

3.1.3.2 Résultats obtenues avec un vent constant

Pour un vent constant égale à 7 m/s, on obtient la courbe suivante de la puissance, pour le modèle non linéaire :

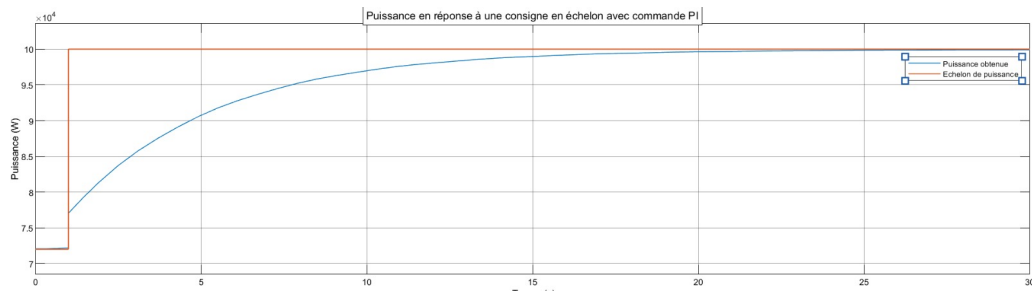


FIGURE 3.4 – Comparaison puissance référence (en bleu) et puissance issu du modèle (en rouge)

On obtient un temps de réponse de 13,6 secondes et on a pas de dépassement. On peut donc considérer que le cahier des charges n'est pas respecté. Ceci peut provenir de la non-linéarité du système.

3.1.3.3 Résultats obtenues avec un vent variable

Pour un vent variable :

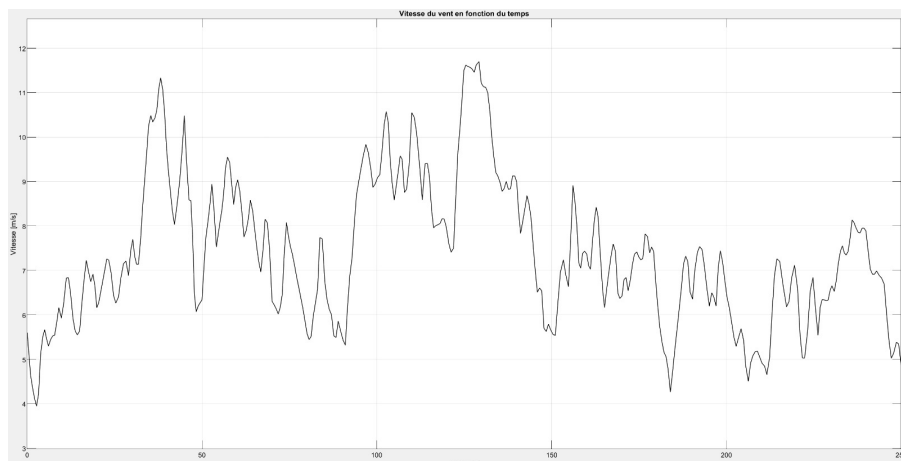


FIGURE 3.5 – Courbe de la vitesse du vent

On obtient la courbe de puissance suivante :

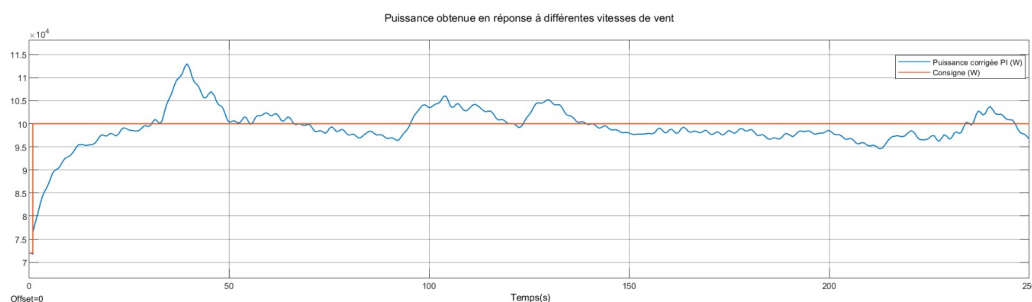


FIGURE 3.6 – Comparaison puissance de référence (en bleu) et puissance du modèle (en rouge)

On a une erreur maximale de 45% autour de la valeur finale. C'est bien au-dessus des attentes du cahier des charges. Il faudrait donc utiliser un correcteur plus performant.

3.1.4 Robustesse du système linéaire corrigé

On obtient le diagramme de Bode corrigé :

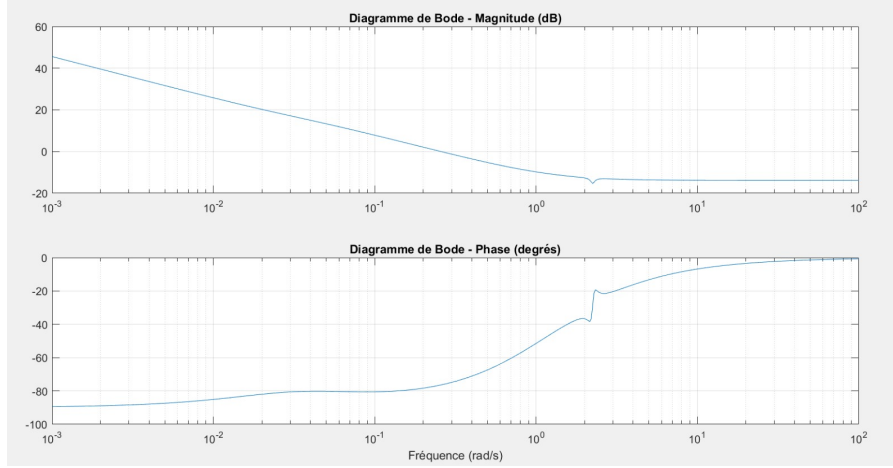


FIGURE 3.7 – Diagramme de Bode pour T_g

On a bien une marge de phase de 115° et une marge de gain infini. Le système est stable et assez robuste.

3.2 MPPT : Maximum Power Point Tracking

On observe que le maximum est obtenu pour $\theta = 0^\circ$. En effet, lorsque l'angle de calage est proche de zéro, les pales offrent une résistance minimale à l'air, permettant au vent de les faire tourner plus rapidement. On peut ensuite chercher à asservir la vitesse de rotation pour obtenir $\lambda = 8$, car c'est à ce λ qu'on a C_{pmax} . Cependant, on pourrait choisir θ pour avoir une plage de fonctionnement optimal plus grande. En effet, on remarque que plus θ augmente, plus les variations autour du maximum global sont faibles. C'est pourquoi il peut être intéressant de choisir un θ plus élevé. On a ici choisi $\theta = 5^\circ$.

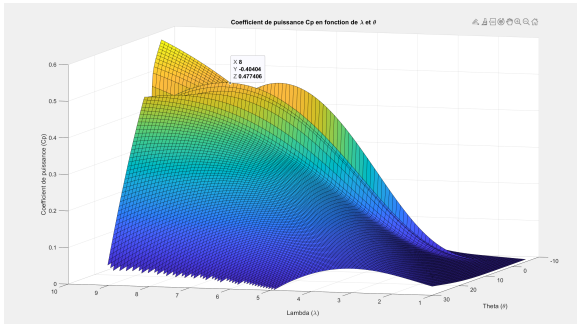


FIGURE 3.8 – Modélisation 3D de $C_p(\theta, \lambda)$

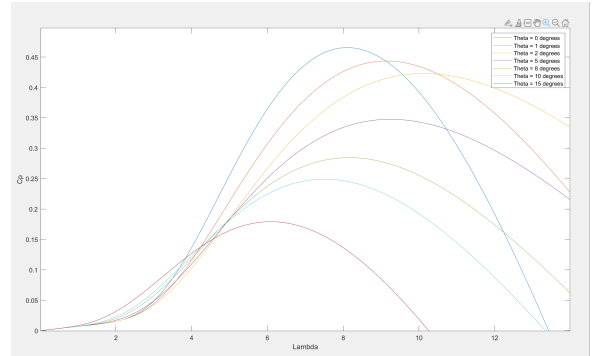


FIGURE 3.9 – Courbe de C_p en fonction de λ à des θ fixées

Pour faire apparaître le MPPT, on fixe la valeur de C_p à son maximum pour $\theta = 5^\circ$. On a $C_p = 0.347$. Or, l'expression de la puissance est la suivante :

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p v^3$$

Ainsi, P ne dépend dans cette partie que de la vitesse du vent.

Et en l'implémentant sur le schéma simulink on obtient les résultats suivants :

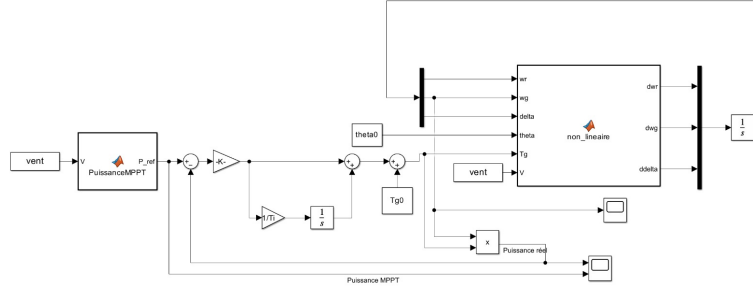


FIGURE 3.10 – Schéma Simulink avec MPPT

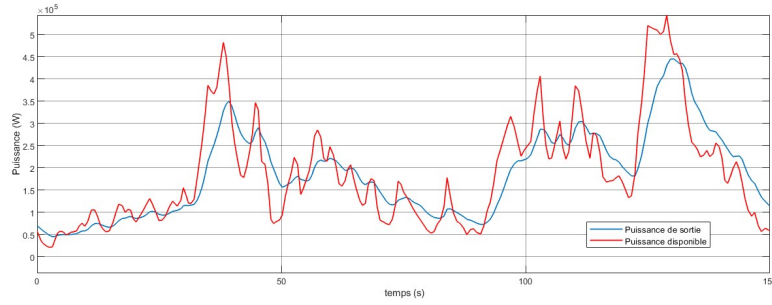


FIGURE 3.11 – Comparaison puissance réel obtenu à la puissance de référence obtenu à partir du vent variable

La Puissance réelle arrive en partie à suivre la dynamique de la puissance disponible demandé, mais le temps de réponse du système est trop lent pour exactement suivre la consigne de Puissance. Ce temps de réponse trop long permet en revanche d'avoir une courbe plus lisse.

3.3 Correcteur par retour d'état

3.3.1 Modélisation globale : avec action intégrale

Dans l'étude du correcteur par retour d'état, on a décidé de partir sur une action intégrale dans toutes les situations avec un système augmenté en supposant que l'état du système est mesuré.

On introduit la valeur σ qui est l'intégrale de la différence de la puissance par rapport à la référence :

$$\sigma = \int_0^t (P(\tau) - P_{ref}) d\tau = \int_0^t (\omega_{g0} T_g + T_{g0} \omega_g - P_{ref}) d\tau$$

Ainsi, on obtient le système augmenté suivant :

$$\dot{X}_a = A_a X(t) + B_a U(t)$$

$$\text{avec } A_a = \begin{bmatrix} & & & 0 \\ & A & & 0 \\ & & & 0 \\ 0 & T_{g0} & 0 & 0 \end{bmatrix}, B_a = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \\ B_{31} & B_{32} \\ 0 & \omega_{g0} \end{bmatrix}$$

Le modèle Simulink obtenu est le suivant :

On remarque directement sur la courbe que la stabilité est respectée puisqu'elle converge. Le temps de premier maximum est de 2.37 secondes, ce qui respecte le cahier des charges. Le dépassement est de environ 1% ce qui est inférieur à 10%. Cependant, on a une erreur statique non négligeable de l'ordre de 3%. Le cahier des charges n'est pas respecté car l'erreur statique est trop élevée, il est requis une erreur statique quasi nulle. Cela peut s'expliquer par les non linéarités du système, on place les pôles par rapport au système linéaire, alors qu'ici on fait un retour d'état sur un système non linéaire.

3.3.2.3 Avec une perturbation de vent

Pour voir l'impact d'une perturbation de vent, on rajoute un échelon de vent de 1 m/s à partir de 30 secondes et observe la courbe suivante autour de l'équilibre.

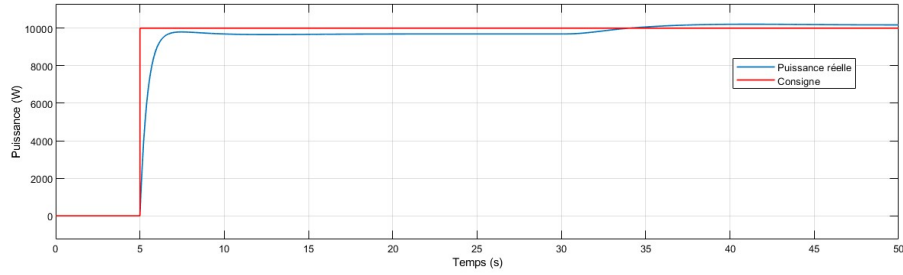


FIGURE 3.14 – Réponse de la puissance à un échelon de 10 000 W et perturbation

On remarque que l'échelon de vent génère une erreur statique positive qui dans le cas présent compense une partie de l'erreur statique présente sans la perturbation du vent.

3.3.3 Correcteur LQI

3.3.3.1 Modélisation

Pour optimiser la commande par retour d'état, on peut utiliser une commande LQ qui va nous permettre d'obtenir une nouvelle matrice K mieux adapté minimisant :

$$J = \int_0^\infty (X_a^T Q X_a + U^T R U) dt$$

$$\text{avec } Q = \begin{bmatrix} 0.01 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 100 \end{bmatrix}$$

Les coefficients des deux matrices ci-dessus ont été choisis pour permettre aux consignes de rester dans leur domaine limite (en particulier θ), tout en assurant une erreur statique nulle (plus de poids sur σ) et une réduction des oscillations (moins de poids sur les variables d'états).

3.3.3.2 Résultats obtenus

Pour un échelon de puissance de 5000, on obtient le résultat suivant autour de l'équilibre :

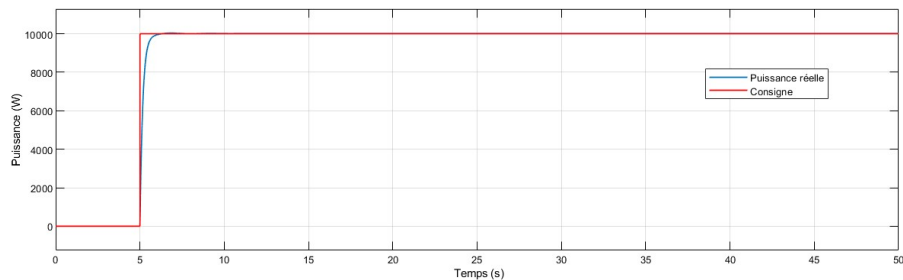


FIGURE 3.15 – Réponse de la puissance à un échelon de 10 000 W

On remarque que le temps de premier dépassement est plus rapide que pour la méthode de placement de pôles, en effet, ici de l'ordre de 2 secondes. Le dépassement est aussi réduit puisqu'il est maintenant de 0.01%. La grande amélioration grâce au LQI est maintenant l'absence d'erreur statique.

3.3.3.3 Avec une perturbation de vent

Pour voir l'impact d'une perturbation de vent, on soumet notre système à un vent variable pour une consigne de -34 000 Watts en comparaison avec la puissance à l'équilibre. On choisit -34 000 Watts pour s'adapter à certaines fortes valeurs de perturbation.

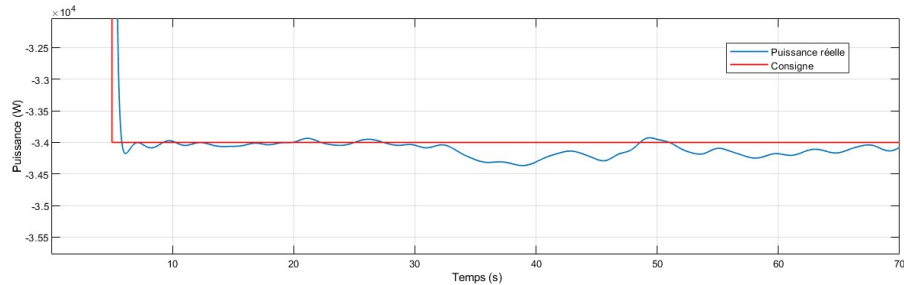


FIGURE 3.16 – Réponse de la puissance à un échelon de - 34 000 W et perturbation

On remarque que cela entraîne une légère erreur maximale de l'ordre de 1%, pour un profil de vent très variable, donc en comparant à la commande par placement de pôle, l'erreur créée ici est beaucoup moins importante.

3.4 Comparaison des Correcteurs LQI et PI :

Pour comparer les correcteurs PI et LQI nous utilisons un tableau récapitulatif qui se base sur les critères du cahier des charges :

/	PI	LQI
Temps de réponse	13.6 s	2 s
Dépassement	Aucun	0.01 %
Erreur Statique	Aucune	Aucune
Erreur Perturbation	45%	1%

On remarque que même si le correcteur PI est meilleur sur le critère du dépassement, il est largement dépassé par le correcteur LQI optimisé sur les autres critères. En effet, le correcteur LQI est plus rapide, avec une erreur de perturbation beaucoup plus faible qui respecte de la cahier des charges. En ce qui concerne l'erreur statique, les deux correcteurs sont à peu près équivalents. Pour conclure, le correcteur LQI est le correcteur le plus adapté pour un suivi de consigne de puissance.

Chapitre 4

Consigne optimale du parc éolien

4.1 Modélisation

Dans cette étude, on a 10 éoliennes les unes après les autres et le but est de maximiser la puissance totale reçue par les 10 éoliennes en jouant sur la puissance reçue de chaque éolienne. On a pour cela pris une expression simplifiée de C_p et $v_{entre} = 10m/s$:

$$C_p = 4\alpha(1 - \alpha)^2 \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{v_{amont} - v_{aval}}{v_{amont}}$$

On a différents modèles :

1. Le premier modèle étudié est le modèle où chaque éolienne est à son C_p maximal donc $v_{aval} = \frac{2}{3}v_{amont}$
2. Le deuxième modèle s'obtient en optimisant la valeur de puissance totale, en jouant sur les différents α consécutifs à l'aide de la fonction fmincon

4.2 Comparaison des modèles

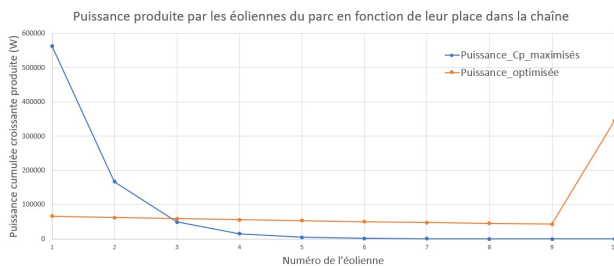


FIGURE 4.1 – Comparaison puissance

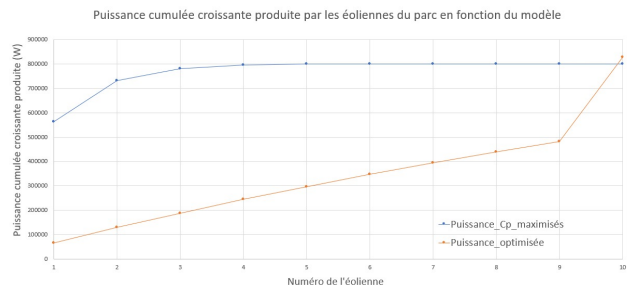


FIGURE 4.2 – Comparaison puissance cumulée

On remarque sur les 2 figures ci-dessus que le modèle optimisée est meilleur de 26 kW pour 10 éolienne, ce qui n'est pas vraiment significatif.

Conclusion

Nous savons désormais quelle puissance imposer sur chacune des 10 éoliennes du parc. Voici donc les pistes à suivre pour le projet :

1. Trouver les puissances optimales de chaque éolienne du parc pour un vent variable.
2. Réaliser une modélisation Simulink du parc éolien pour déterminer l'impact de l'éolienne précédente sur la loi de commande de l'éolienne suivante.