

COMPARAISON PAR SIMULATIONS ET ESSAIS BASSINS DE CONTRÔLEURS D'ÉOLIENNE FLOTTANTE

SIMULATIONS AND WAVE TANK TEST BENCHMARK OF FLOATING OFFSHORE WIND TURBINES (FOWT) CONTROLLERS

S. PUECH⁽¹⁾, S. KERKENI⁽¹⁾

simon.puech@dice-engineering.com ; sofien.kerkeni@dice-engineering.com

⁽¹⁾ Département R&D, D-ICE engineering, Nantes

9 novembre 2024

Résumé

Le contrôle de la turbine joue un rôle déterminant dans les performances des éoliennes flottantes. Les problématiques liées à l'amortissement négatif ainsi qu'à l'incertitude des conditions de vent et de mer constituent des défis techniques majeurs, nécessitant la mise en œuvre de stratégies de contrôle avancées pour optimiser la production d'énergie tout en minimisant les efforts structurels.

Cet article présente une comparaison détaillée des performances, évaluées à travers des simulations couplées et des essais en bassin, entre un contrôleur BLADiCS utilisant une stratégie hybride non linéaire et robuste HRC, développé par D-ICE Engineering, et le contrôleur ROSCO, conçu par le NREL [1] et représentant l'état de l'art. La stratégie HRC propose une approche novatrice en intégrant un estimateur de vitesse du vent basé sur un modèle aérodynamique BEM [4] (Blade Element Momentum), combiné à une technique de contrôle robuste avec séquençement de gains. Les performances sont principalement analysées en termes de production énergétique et de réduction des dommages à charge équivalentes (DEL) à la base de la tour, ainsi qu'à travers les moments de flexion des pales et la gestion des sur-vitesses et des dépassements de puissance. Les essais expérimentaux et les simulations numériques s'appuient sur le code OpenFAST, un simulateur open-source pour éoliennes développé par le NREL.

Les deux contrôleurs présente des modes de fonctionnement différent. Le contrôleur BLADiCS améliore de 2.4% le productible en réduisant l'endommagement au pied de la tour de 9.7% au prix d'un contrôle assouplis sur les précisions des vitesses rotor et des puissances générées.

Summary

Wind turbine controllers play a critical role in the performance of floating offshore wind turbines (FOWT). The issues of negative damping and uncertainties related to waves and wind present challenges that necessitate advanced control strategies to optimize energy production and reduce structural damage.

This paper presents a performance comparison based on coupled simulations and wave tank tests between the state-of-the-art open-source Reference Open Source COntroller ROSCO controller [1], developed by the NREL, and a proprietary controller code BLADiCS, including a novel nonlinear Hybrid and Robust Control (HRC).

The HRC strategy is hybrid, robust and nonlinear. It integrates an innovative Blade Element Momentum (BEM) [4] model-based wind speed estimator with a robust gain-scheduled controller. The performance evaluation focuses primarily on power production and the Damage Equivalent Load (DEL) at the tower base and secondarily on the blade root DEL, as well as overspeed and overpower occurrences. The open-source wind turbine simulation tool OpenFAST, developed by the National Renewable Energy Laboratory (NREL), was used for both wave tank tests and simulations.

The results indicate that the BLADiCS controller increases power production by 2.4% and reduces the DEL on the tower base moment by 9.7%, albeit with a slightly less precise tracking of power and rotor speed.

I – Introduction

L'évaluation du potentiel de production énergétique et de la durée de vie d'une éolienne flottante peut être effectuée en simulant un grand nombre de conditions environnementales variées. Ces simulations temporelles couplées requièrent un contrôleur de turbine capable d'ajuster en continu l'angle des pales ainsi que le couple de la génératrice pour répondre aux fluctuations dynamiques du milieu ambiant. Dans le cadre du projet de recherche CREATIF, financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), diverses stratégies de contrôle ont été adaptées au contexte de l'éolien flottant et implémentées dans le code de contrôle propriétaire développé par D-ICE. Un total de 20 contrôleurs ont été essayés, et cet article présente en détail les résultats obtenus pour deux d'entre eux : le contrôleur ROSCO [1] et le contrôleur BLADiCS.

En s'appuyant sur le modèle de turbine NREL 5 MW associé à la plateforme flottante OC4, une quinzaine de cas expérimentaux ont été essayés et simulés. Par la suite, nous nous référerons aux termes détaillés dans la Table 1.

P	Puissance générée
Ω	Vitesse de rotation du rotor
ϕ	Angle de tangage de la plateforme
v_{ptfm}	vitesse de déplacement sous le vent
ws	Vitesse du vent (<i>wind speed</i>)
ws_{rated}	Vitesse du vent nominale
\hat{ws}	Vitesse du vent estimée
β	Angle des pales
τ, τ_{gen}	Couple de la génératrice
τ_{aero}	Couple aérodynamique
τ_{rated}	Couple nominal de la génératrice
H_h	Hauteur du hub au-dessus de l'axe de rotation en tangage du flotteur
gb	Rapport de la boîte de vitesse
I_{eq}	Inertie équivalente rapportée sur l'axe rotor
DEL	Damage Equivalent Load, ou Charge équivalente d'endommagement

TABLE 1 – Tables des variables et acronymes

II – Contrôleur BLADiCS

Le contrôleur BLADiCS développé par D-ICE, permet actuellement de contrôler de manière coordonnée l'angle des pales ainsi que le couple de la génératrice. Sa plage d'utilisation, s'étendant de 3 m/s à 25 m/s de vitesse du vent, le rend apte à fonctionner dans des vents de région 2 et 3. Ce contrôleur repose sur trois composantes essentielles : un estimateur de vitesse du vent basé sur le modèle BEM, une boucle ouverte reposant sur l'équilibre quasi-stationnaire de la plateforme, et une boucle fermée inspirée des modes glissants. Son schéma de fonctionnement est illustré à la Figure ??.

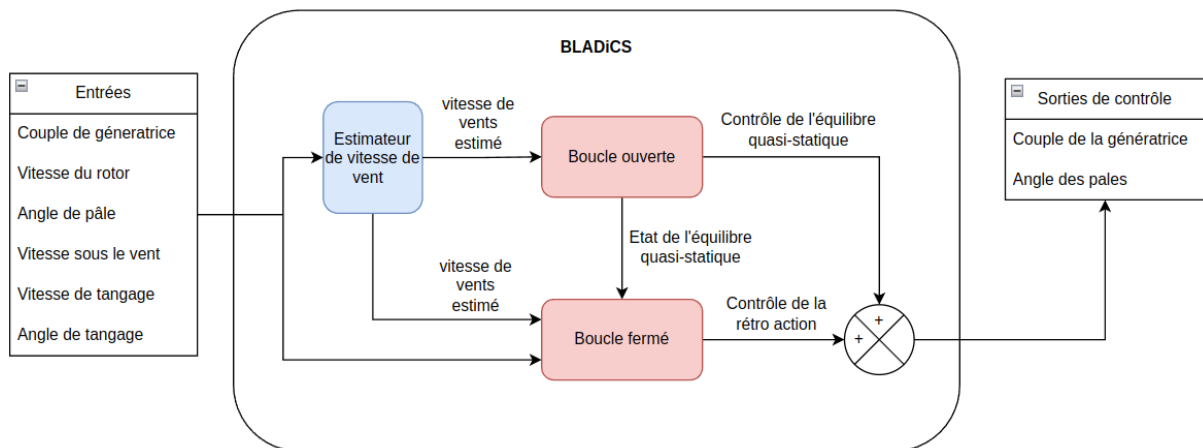


FIGURE 1 – Schéma de fonctionnement du contrôleur BLADiCS

II – 1 Estimateur de vent

L'estimateur de vitesse du vent constitue un élément fondamental du contrôleur. Son fonctionnement repose sur un code de calcul BEM [4] (Blade Element Theory). Nous générons des tables fournissant les efforts aérodynamiques, notamment le couple aérodynamique $\tau_{aero}(ws, \Omega, \beta)$, en fonction de trois paramètres : la vitesse du vent ws , la vitesse

de rotation du rotor Ω et l'angle des pales β . Pour des valeurs données de Ω et de β , nous calculons (non trivialement) la bijection $ws(\tau_{aero})_{\Omega, \beta}$ à partir de la relation $\tau_{aero}(ws)_{\Omega, \beta}$.

Le lien entre le couple aérodynamique et le couple de la génératrice est établi en tenant compte du rapport de la boîte de vitesses g_b ainsi que de l'inertie équivalente du rotor et de l'arbre de la génératrice ramenée sur le rotor, notée I_{eq} . Cette relation est exprimée par l'équation suivante : $\tau_{aero} = \tau_{gen}g_b + I_{eq}\dot{\Omega}$.

Bien que le code BEM repose sur une approche quasi-statique, l'écoulement le long des pales présente des vitesses relatives locales affectées par la turbulence du champ de vent ainsi que par les mouvements du rotor dans celui-ci. Concernant la turbulence, nous posons l'hypothèse que les effets dynamiques non pris en compte par le calcul BEM demeurent négligeables lorsqu'ils sont intégrés sur l'ensemble du rotor. En ce qui concerne les mouvements du rotor dans le champ de vent, un correctif est calculé à partir de la vitesse du rotor projetée $\cos(\phi)H_h\dot{\phi}$ sur l'horizon, lors de la rotation de la plateforme à une vitesse $\dot{\phi}$, avec un rotor situé à une hauteur H_h au-dessus de l'axe de rotation, et une translation de la plateforme dans le sens du vent à une vitesse v_{ptfm} . Le correctif utilisé est le suivant :

$$\hat{w}s = ws(\tau_{aero}, \Omega, \beta) - \cos(\phi)H_h\dot{\phi} - v_{ptfm} \quad (1)$$

L'utilisation de signaux d'entrée filtrés pour les hautes fréquences permet d'obtenir une estimation dynamique de la vitesse du vent moins sujette au bruit, rendant ainsi l'estimation plus appropriée pour les applications de contrôle.

II – 2 Boucle ouverte

Le contrôleur a pour objectif d'opérer l'éolienne flottante autour des points de fonctionnement quasi-statiques optimaux. Ces points sont établis à partir d'une optimisation de la puissance P sous contraintes, réalisée pour chaque vitesse de vent ws . Dans le cadre de cette optimisation, les vitesses de rotor Ω , l'angle des pales β , ainsi que le couple de la génératrice τ_{gen} sont contraints dans leurs plages de fonctionnement respectives. L'estimateur de vent permet d'interroger la table des points d'opérations afin d'obtenir les commandes en boucle ouverte, avec $\tau_{OL} = \tau(\hat{w}s)$ et $\beta_{OL} = \beta(\hat{w}s)$, ainsi que les variables d'état de l'éolienne, telles que $\Omega(\hat{w}s)$ ou $\phi(\hat{w}s)$, qui sont indispensables pour le contrôle en boucle fermée.

II – 3 Boucle fermée

En s'inspirant des travaux sur le contrôle en mode glissant pour des systèmes linéaires hyperboliques [3], nous proposons une formulation adimensionnelle du contrôleur reposant sur la vitesse de rotation nominale du rotor Ω_{rated} , le couple de la génératrice en condition nominale τ_{rated} , un angle de tangage de la plateforme de référence ϕ_{ref} , un angle de pôle de référence β_{ref} et une constante de temps τ_{tilt} .

$$\Omega_{rated} = 12.1rpm \quad \text{and} \quad \tau_{rated} = 43015kNm \quad (2)$$

$$\phi_{ref} = 5deg, \quad \beta_{ref} = 5deg \quad \text{and} \quad \tau_{tilt} = 2s \quad (3)$$

Les sorties de boucles ouvertes représentent l'état cible du contrôleur et sont utilisées dans le calcul des écarts par rapport à l'objectif (eq. 4). Nous introduisons la variable $\gamma \in [0, 1]$, permettant d'attribuer de l'importance aux objectifs de contrôle et d'obtenir la variable de glissement suivante (eq. 5) :

$$\Delta\Omega = \Omega - \Omega_{OL} \quad ; \quad \Delta\dot{\phi} = \dot{\phi} - \dot{\phi}_{OL} \quad \text{and} \quad \Delta\phi = \phi - \phi_{OL} \quad (4)$$

$$s = \gamma * \frac{\Delta\Omega}{\Omega_{rated}} + (1 - \gamma) * \frac{\Delta\dot{\phi} + \frac{\Delta\phi}{\tau_{tilt}}}{\phi_{ref}} \quad (5)$$

$$U_\tau = -K_1 \text{sgn}(s) \sqrt{|s|} * \tau_{rated}, \quad U_\beta = -K_1 \text{sgn}(s) \sqrt{|s|} * \beta_{ref} \quad (6)$$

$$\dot{\nu}_\tau = -K_2 \text{sgn}(s) * \tau_{rated}, \quad \dot{\nu}_\beta = -K_2 \text{sgn}(s) * \beta_{ref} \quad (7)$$

Un paramètre $\alpha(ws) \in [0, 1]$ (eq. 8) permet d'attribuer la sortie de contrôle au couple de la génératrice ou à l'angle des pales. Le contrôle appliqué est la somme des sorties des boucles ouvertes et fermées (eq. 9).

$$\tau_{CL} = -\alpha((U_\tau + \nu_\tau), \quad \beta_{CL} = -(1 - \alpha)(U_\beta + \nu_\beta) \quad (8)$$

$$\tau_{gen} = \tau_{OL} + \tau_{CL} \quad \text{and} \quad \beta = \beta_{OL} + \beta_{CL} \quad (9)$$

II – 4 Stabilité

Tout d'abord, la boucle fermée repose sur une formulation du contrôle en mode glissant de type 'Super-twisting', dont la stabilité au sens de Lyapunov a été établie par les travaux du LS2N [3].

Ensuite, pour le cas du contrôleur complet, englobant l'estimateur, la boucle ouverte et la boucle fermée, la stabilité n'est pas formellement démontrée, mais elle est observée. En parallèle des simulations réalisées pour les essais en bassin, un ensemble de 216 simulations a été mené dans diverses conditions de vent et de vagues, sans jamais obtenir de divergence.

Enfin, il est important de noter que l'estimateur de vent fournit une vitesse de vent bornée $\hat{ws} \in [2, 50m/s]$, qui est utilisée dans la table précalculée et bornée de la boucle ouverte.

III – Présentation de la méthode

III – 1 Caractéristiques de l'éolienne flottante

L'éolienne flottante étudiée se compose d'une turbine de 5 MW et d'un flotteur semi-submersible OC4, tous deux open source, comme défini dans l'article du NREL [5]. Pour rappeler quelques caractéristiques clé, l'éolienne possède un rotor de 63 m de rayon, positionné à environ 90 m d'altitude. En régime nominal, soit pour des vents dépassant 11,4 m/s, la production de 5 MW est atteinte avec une vitesse de rotor de 12,1 rotations par minute. Une maquette au rapport d'échelle 1 :32 a été assemblée et installée par le LHEEA dans leur bassin de houle pour les essais. L'ensemble nacelle-rotor y a été remplacé par un actionneur équipé d'hélices permettant de reproduire les effets aérodynamiques et inertiels de l'assemblage nacelle-rotor. Ce procédé, nommé SHIL, a fait l'objet d'une thèse au LHEEA [2].

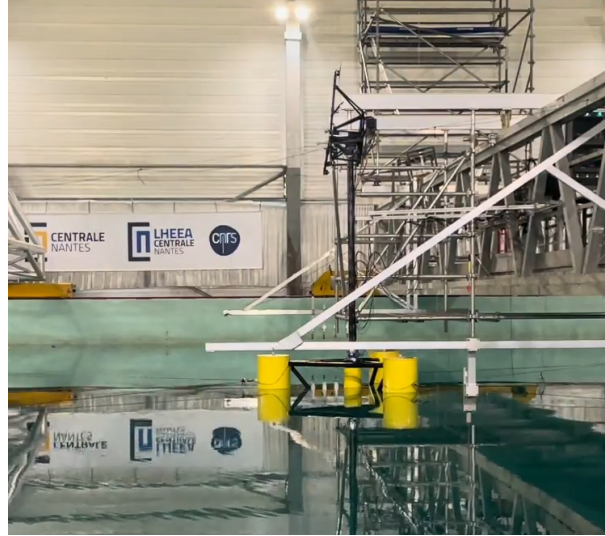


FIGURE 2 – Maquette 1 :32 réalisée par le LHEEA dans le bassin de houle

III – 2 Essais réalisés et simulations

Des essais et des simulations ont été réalisés afin de comparer les deux contrôleurs. Ces simulations combinent des conditions de vent probables ainsi que des conditions de houle plus extrêmes. Une intensité de turbulence de 12 % a été appliquée dans chaque cas. Ces 15 simulations ont été extraites d'un ensemble total de 216 simulations, représentant 91,7 % de la durée de vie de l'éolienne flottante, où les 8.3% restant représente des cas où l'éolienne n'est pas en fonctionnement. Cette sélection couvre 6,9 % des cas, ce qui constitue une des limitations de l'estimation du DEL et du productible.

Il convient de noter que la dernière simulation permet de vérifier le comportement des contrôleurs au-delà de la vitesse de vent maximale ($w_{s_{max}} = 25m/s$) à laquelle l'éolienne doit être arrêtée.

région	R2				
id	0	1	2	3	4
occurrence	1.000e-02	1.000e-02	1.000e-02	1.000e-02	1.933e-05
w_s - Vitesse du vent (m/s)	5	5	8	8	10
H_s - Hauteur significative (m)	2	5.5	2	5.5	2
T_p - Période (s)	8	10.5	8	10.5	8
région	R2.5				
id	5	6	7	8	9
occurrence	5.451e-06	1.349e-02	1.053e-03	2.388e-04	1.025e-04
w_s - Vitesse du vent (m/s)	11	11	11.5	12	12
H_s - Hauteur significative (m)	3.5	6	3.5	3.5	3.5
T_p - Période (s)	9	11	9	9	9
région	R3				
id	10	11	12	13	14
occurrence	1.933e-05	5.451e-06	1.349e-02	1.053e-03	2.388e-04
w_s - Vitesse du vent (m/s)	12	14	14	20	30
H_s - Hauteur significative (m)	3.5	3.5	7	7	4
T_p - Période (s)	9	9	12	12	9.5

TABLE 2 – Spécification des essais et simulations

Les résultats expérimentaux permettent de comparer les dynamiques du flotteur et

des variables de contrôle (P , Ω et ϕ). Les essais réalisés en bassin n’ont pas permis d’obtenir des signaux d’efforts au pied de la tour suffisamment fiables pour justifier l’analyse d’endommagement sur la base des résultats expérimentaux. Par conséquent, les analyses d’endommagement reposent principalement sur les simulations numériques des scénarios étudiés.

III – 3 Indicateurs de performance

L’analyse repose principalement sur des indicateurs reflétant le productible et la durée de vie. Nous comparons les moyennes et les maxima de la puissance générée P pour chaque expérience afin de caractériser le productible. Concernant la durée de vie, nous nous intéressons particulièrement à la valeur de la charge équivalente de fatigue (DEL) du moment au pied de la tour, dérivée des simulations. Secondairement, nous vérifions les vitesses du rotor en mesurant les vitesses de rotation moyennes, le pourcentage de temps en sur-vitesse et l’endommagement au pied de pale (DEL).

IV – Résultats

IV – 1 Puissance générée, couple de la génératrice et vitesses rotor

Le contrôleur ROSCO présente un nombre de dépassements de puissance inférieur à celui du contrôleur BLADiCS lors des essais en bassin, comme illustré dans la Table 3.

id (id)	vitesse du vent (m/s)	BLADiCS		ROSCO	
		P_{gen} max (kW)	P_{gen} moyennée (kW)	P_{gen} max (kW)	P_{gen} moyennée (kW)
0	5.0	828	398	795	413
1	5.0	692	377	802	395
2	8.0	2833	1681	2938	1688
3	8.0	2982	1664	3178	1677
4	10.0	5152	3270	5026	3227
5	11.0	5217	4121	5073	3958
6	11.0	5292	4162	5080	3979
7	11.5	5270	4428	5067	4234
8	12.0	5408	4677	5094	4447
9	12.0	5402	4632	5108	4410
10	12.0	5320	4670	5092	4465
11	14.0	5438	5053	5107	4792
12	14.0	5493	4951	5118	4793
13	20.0	5621	4951	5173	4999
14	30.0	5868	4888	5223	5000

TABLE 3 – Puissances maximales et moyennes obtenues lors des expériences

Les deux contrôleurs affichent des courbes de puissance légèrement distinctes. Le contrôleur BLADiCS atteint la puissance nominale en région 2.5 plus rapidement que le contrôleur ROSCO, qui, quant à lui, cible de manière plus précise la puissance nominale dans la région 3.

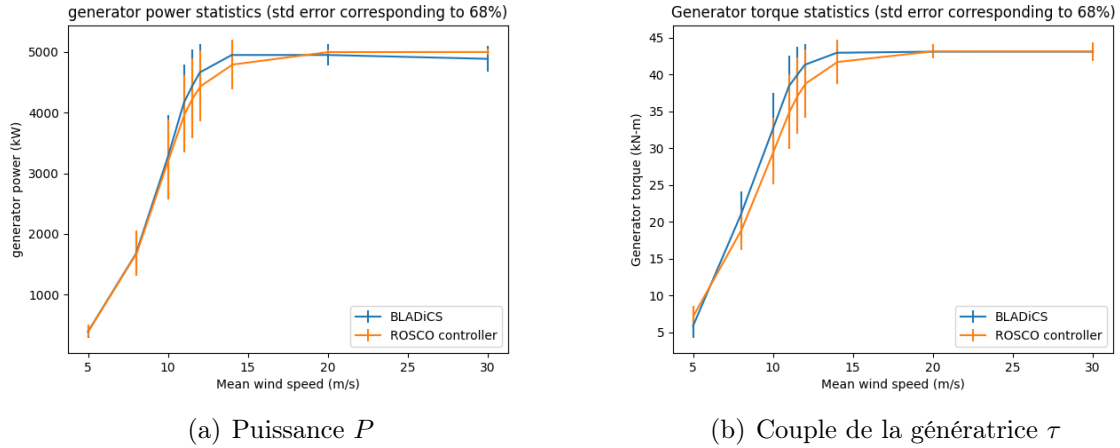


FIGURE 3 – Écart standard et moyenne de la puissance et du couple de la génératrice

Chaque simulation a une occurrence associée p . La puissance moyenne ($P_{moy} = \frac{\sum_i p_i P_i}{\sum_i p_i}$) pour le contrôleur BLADiCS est d'environ 2,4 % supérieure à celle du contrôleur ROSCO. Cette différence s'explique par des points de fonctionnement plus avantageux en région 2.5, où le vent est plus probable qu'en région 3. Le contrôleur BLADiCS présente des surpuissances plus fréquentes et significatives que le contrôleur ROSCO. La précision réduite du contrôleur BLADiCS peut être attribuée à la saturation du couple de la génératrice qui impose la contrainte $\tau_{gen} \leq \tau_{rated}$. Cette saturation n'existe pas sur le contrôleur ROSCO.

		BLADiCS			ROSCO		
id	vitesse du vent	Ω moyen	Ω max	Temps en sur-vitesse	Ω moyen	Ω max	Temps en sur-vitesse
(id)	(m/s)	(rpm)	(rpm)	%	(rpm)	(rpm)	%
0	5	6,873	7,013	0	5,728	7,127	0
1	5	6,901	7,299	0	5,65	6,737	0
2	8	8,231	10,011	0	9,164	11,115	0
3	8	8,18	10,167	0	9,145	11,371	0
4	10	10,36	12,487	0	11,28	12,404	0
5	11	11,228	12,653	0	11,82	12,541	0
6	11	11,25	12,819	0	11,829	12,508	0
7	11,5	11,535	12,757	0	11,877	12,522	0
8	12	11,76	13,088	0	11,921	12,614	0
9	12	11,703	13,072	0	11,912	12,717	0
10	12	11,752	12,883	0	11,932	12,599	0
11	14	12,431	13,188	0	11,976	12,711	0
12	14	12,022	13,292	0	11,978	12,798	0
13	20	11,982	13,603	0,12	12,089	13,057	0
14	30	11,828	14,201	0,41	12,1	13,626	0,15

TABLE 4 – Vitesses de rotation du rotor Ω maximales et moyennes obtenues lors des expériences

En accord avec les résultats précédents concernant la puissance P et le couple de la génératrice τ illustrés à la figure 3, nous observons en région 3 que le contrôleur ROSCO cible mieux la vitesse nominale Ω_{rated} et affiche des valeurs maximales moins importantes. Pour quantifier les événements de vitesses excessives, nous définissons la sur-vitesse comme le moment où le rotor tourne à plus de 10 % de sa vitesse nominale Ω_{rated} . Ces cas sont très rares et se produisent particulièrement en fin de région 3.

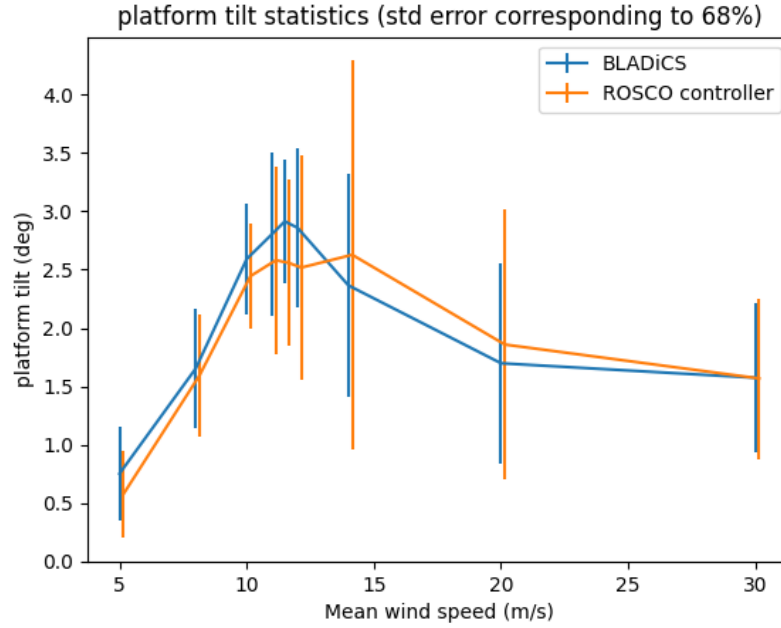


FIGURE 4 – Moyenne et écart standard de l'angle de tangage ϕ lors des expériences

Concernant les mouvements de la plateforme, la figure 4 illustre que le contrôleur BLADiCS permet d'obtenir une plateforme plus stable, en particulier en début de région 3.

IV – 2 Endommagement du pied de tour et des pieds de pales

Le pied de la tour constitue une partie critique de l'éolienne. Il est donc essentiel de minimiser les endommagements à cet endroit pour assurer la durabilité de l'éolienne. À partir des signaux de moments au pied de la tour, nous sommes en mesure de calculer l'endommagement, sans appliquer de correctif de Goodman, en utilisant une courbe S-N de Basquin avec une pente en diagramme log-log de $m = 4$ pour la tour et $m = 9$ pour les pales.

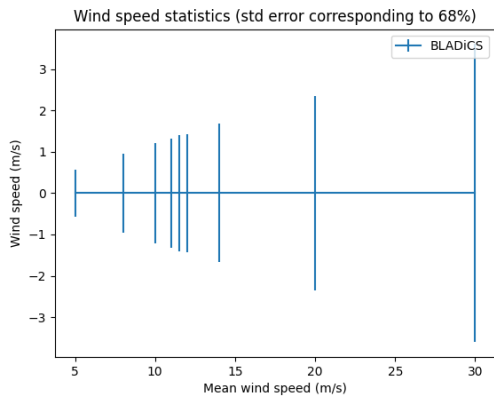
		BLADiCS				ROSCO			
id	vitesse du vent	<i>DEL</i>	<i>DEL</i>	<i>DEL</i>	<i>DEL</i>	<i>DEL</i>	<i>DEL</i>	<i>DEL</i>	<i>DEL</i>
(id)	(m/s)	<i>M_y</i>	<i>M_{Bx}</i>	<i>M_{By}</i>	<i>M_{Bz}</i>	<i>M_y</i>	<i>M_{Bx}</i>	<i>M_{By}</i>	<i>M_{Bz}</i>
		(kN- m)	(kN- m)	(kN- m)	(kN- m)	(kN- m)	(kN- m)	(kN- m)	(kN- m)
0	5.0	36415	9038	1952	49	36415	9038	1952	49
1	5.0	77917	8919	2010	45	77917	8919	2010	45
2	8.0	56446	9667	3875	113	56446	9667	3875	113
3	8.0	91584	9633	4044	122	91584	9633	4044	122
4	10.0	50900	9834	4743	163	50900	9834	4743	163
5	11.0	72179	10055	6265	173	72179	10055	6265	173
6	11.0	93593	10051	6977	172	93593	10051	6977	172
7	11.5	75100	10087	6540	168	75100	10087	6540	168
8	12.0	79715	10110	7752	171	79715	10110	7752	171
9	12.0	96243	10047	7350	171	96243	10047	7350	171
10	12.0	74550	10076	6852	170	74550	10076	6852	170
11	14.0	93027	10273	8234	162	93027	10273	8234	162
12	14.0	113436	10375	9266	169	113436	10375	9266	169
13	20.0	114536	11179	10439	149	114536	11179	10439	149
14	30.0	105670	11992	11666	148	105670	11992	11666	148

TABLE 5 – *DEL* des moments au pied de tour M_y et pieds de pales M_{Bx} , M_{By} et M_{Bz}

Globalement, le *DEL* estimé pour le moment à la base de la tour selon l'axe y , noté M_y , est réduit de 9,7 % pour le contrôleur BLADiCS par rapport au contrôleur ROSCO. Le moment le plus significatif au pied des pales se situe autour de l'axe de rotation du rotor x . L'axe y , qui est perpendiculaire à l'axe de la pale et à l'axe x , représente le moment "avant-arrière" M_{By} de l'éolienne. Le dernier moment M_{Bz} est très faible et correspond à la torsion selon l'axe de la pale. En ce qui concerne le moment à l'embase de la pale autour de l'axe M_{Bx} , la différence entre les deux contrôleurs est anecdotique (inférieure à 0,1 %). Les moments dans les deux autres directions ne semblent pas poser de problèmes.

IV – 3 Justesse de l'estimateur de vent

Lors des simulations, nous enregistrons la vitesse du vent non perturbée au centre du rotor ainsi que la vitesse du vent estimée par le contrôleur BLADiCS. Dans un premier temps, nous caractérisons l'écart-type associé aux variations du signal du vent, exprimé par $ws(t) - ws_{mean}$. Ensuite, nous analysons l'erreur d'estimation, donnée par $\hat{ws}(t) - ws(t)$.



(a) Écart standard lié au signal du vent au centre du rotor $ws(t) - ws_{mean}$



(b) Erreur d'estimation de l'estimateur de vent de BLADiCS $\hat{ws}(t) - ws(t)$

FIGURE 5 – Écart standard et erreur de la vitesse du vent pour différentes simulations

La figure 5 illustre l'ordre de grandeur des écarts-types, le décentrage de l'erreur de l'estimateur, ainsi que l'évolution de l'écart-type en fonction de la vitesse du vent. L'origine de la surestimation moyenne de l'estimateur demeure à identifier, tandis que l'augmentation de l'écart-type semble corrélée à celle du signal estimé.

V – Conclusions et perspectives

Le contrôleur BLADiCS et le contrôleur ROSCO ont été évalués à la fois en bassins et en simulations. Le contrôleur BLADiCS présente un gain de 2,4 % en production, accompagné d'une réduction de 9,7 % du DEL au pied de la tour. Les comparaisons concernant le productible et l'endommagement révèlent des comportements distincts entre les deux contrôleurs.

Bien que le contrôleur ROSCO dispose d'outils permettant un réglage rapide, le contrôleur BLADiCS offre un plus grand nombre de paramètres et un processus de réglage moins automatisé. Il serait pertinent de comparer les deux contrôleurs après avoir optimisé leurs réglages afin d'analyser des stratégies de contrôle avec des temps de réglage mesurés et comparables.

Par ailleurs, l'estimateur, utilisant l'inversion de la relation $\tau(ws, \beta, \Omega)$ basé sur des codes de calcul aérodynamique BEM, présente des erreurs moyennes non-négligeables. Une proposition de correctif pourrait être envisagée pour améliorer la précision de l'estimateur. [6]

Références

- [1] N. J. Abbas, D. S. Zalkind, L. Pao, and A. Wright. A reference open-source controller for fixed and floating offshore wind turbines. *Wind Energy Science*, 7(1) :53–73, 2022.
- [2] V. Arnal. *Modélisation expérimentale d'une éolienne flottante par une approche 'software-in-the-loop'*. PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes, 2020. Thèse de doctorat dirigée par Aubrun-Sanches, SandrineBonnefoy, Félicien et Gilloteaux, Jean-Christophe Mécanique des Milieux Fluides Ecole centrale de Nantes 2020.
- [3] I. Balogoun, S. Marx, T. Liard, and F. Plestan. Super-twisting sliding mode control for the stabilization of a linear hyperbolic system. working paper or preprint, Mar. 2022.
- [4] J. N. Burton T, S. D, and B. E. *Wind energy handbook, 2nd ed.* Wiley, 2011.
- [5] A. Robertson, J. Jonkman, M. Masciola, H. Song, A. Goupee, A. Coulling, and C. Luan. Definition of the semisubmersible floating system for phase ii of oc4. *USDOE*, 9 2014.
- [6] Y. Zhou, Q. Xiao, Y. Liu, A. Incecik, C. Peyrard, D. Wan, and S. Li. A CFD Study for Floating Offshore Wind Turbine Aerodynamics in Turbulent Wind Field. ASME 2021 3rd International Offshore Wind Technical Conference :V001T01A005, 02 2021.