



15^{ÈMES} JOURNÉES DE L'HYDRODYNAMIQUE

22 - 24 novembre 2016 - Brest

DEVELOPPEMENT D'UN COUPLAGE HYDRODYNAMIQUE ET AERODYNAMIQUE INSTATIONNAIRE POUR L'ETUDE DES EOLIENNES FLOTTANTES A AXE VERTICAL

*DEVELOPMENT OF A METHOD COUPLING HYDRODYNAMICS AND UNSTEADY
AERODYNAMICS AIMED AT STUDYING FLOATING VERTICAL AXIS WIND TURBINES*

V. Leroy ^{(1), (2)}, J.-C. Gilloteaux ⁽²⁾, M. Philippe ⁽¹⁾, A. Babarit ⁽²⁾, P. Ferrant ⁽²⁾

⁽¹⁾ INNOSEA, 1 rue de la Noë – 44321 Nantes (France)

⁽²⁾ LHEEA, Ecole Centrale de Nantes (ECN), 1 rue de la Noë – 44321 Nantes (France)

Résumé

Afin d'exploiter au mieux le potentiel énergétique marin, des concepts d'éoliennes flottantes voient le jour. Les éoliennes à axe vertical (*Vertical Axis Wind Turbine* : VAWT) sont au centre de plusieurs travaux de recherche pour des applications flottantes [1] [2]. L'aérodynamique de ces éoliennes est très instationnaire. En effet, chaque pale passe à chaque révolution dans le sillage des autres. Les mouvements de la plateforme rendent également l'écoulement sur les pales et dans le sillage encore plus instationnaire avec la possibilité d'avoir le rotor qui évolue dans son propre sillage. Il a été démontré que les méthodes stationnaires (*Double Multiple Stream Tube* (DMST) par exemple) ne sont pas suffisamment précises pour des turbines à axe verticale [Ferreira, 2014]. Ce papier présente l'état d'avancement des développements réalisés pour la réalisation d'un simulateur numérique d'éolienne flottante à axe vertical. Le papier présente en détails le couplage entre le logiciel de tenue à la mer *InWave* [3], avec le solveur aérodynamique *CACTUS* [4]. Des comparaisons avec le logiciel FAST seront présentés dans le cas d'une éolienne à axe horizontal montée sur une plateforme de type SPAR. Le couplage a permis d'obtenir des résultats proches de ceux obtenus par FAST dans le cadre de mouvements de faibles amplitudes, mêmes si des faibles écarts sont dus à des différences dans les deux modèles hydrodynamiques.

Summary

A lot of research has focused over the last decade on Floating Offshore Wind Turbine (FOWT). Vertical Axis Wind Turbines (VAWT) have also been studied for floating applications [1] [2] but the aerodynamics of such turbines is hard to model as it is highly unsteady. Steady methods such as Double Multiple Stream Tube (DMST) may not be accurate enough for large motions of floating systems. In order to study the seakeeping of VAWTs two codes have been coupled in a modular framework: *InWave*, seakeeping code developed at INNOSEA (Nantes, France) and *CACTUS*, a free vortex wake method developed at Sandia National Laboratories (SNL) (USA). This paper presents the coupled method and the first work of verification lead on the NREL 5MW HAWT designed at the National Renewable Energy Laboratory (NREL) on the Hywind SPAR platform as presented in [5]. The results from *InWave-CACTUS* were compared with those from FAST [6]. The coupled method showed good agreement with the results from FAST for small amplitude motions.

1. Introduction

Pour aller plus loin au large et ainsi exploiter un vent de meilleure qualité tout en limitant l'impact sur le littoral, des concepts d'éoliennes flottantes sont développés depuis plusieurs années. Les flotteurs comme les turbines sont au cœur de nombreuses recherches. Les VAWT semblent présenter des intérêts pour des applications flottantes [1]. Par exemple, les parties mécaniques (réducteur, génératrice par exemple) peuvent être situées plus bas, ce qui permettrait selon les concepts de rabaisser le centre de gravité de l'ensemble et donc d'améliorer la stabilité, par rapport à une éolienne flottante à axe horizontal (*Horizontal Axis Wind Turbine* : HAWT) [2]. Ceci permet également de faciliter les opérations de maintenance. En revanche, elles présentent un moment de réaction de la génératrice qui doit être contrebalancé par les lignes d'ancrage. De plus le comportement de ces rotors est très instationnaire : il y a une forte interaction des pales avec leur sillage puisque chaque pale passe dans le sillage des autres et l'angle d'incidence sur la pale varie significativement au cours d'une révolution.

Par essence, une éolienne flottante a un comportement complexe. De forts couplages apparaissent ainsi entre la turbine, son système de contrôle, le support flottant et le système d'amarrage mêlant à la fois de l'hydrodynamique, de l'aérodynamique et de la mécanique. Les efforts hydrodynamiques appliqués à de tels corps flottants peuvent généralement être modélisés par la théorie potentielle linéaire [7]. L'aérodynamique des rotors d'éoliennes est généralement modélisée via des modèles supposant des écoulements stationnaires tels que les méthodes *Blade Element Momentum (BEM)* qui s'appliquent aux éoliennes flottantes à axes horizontaux (*Horizontal Axis Wind Turbine* : HAWT) [8] [9]. La méthode *Double Multiple Stream Tube (DMST)* est une méthode équivalente pour les rotors à axes verticaux [10], mais ces méthodes peuvent être insuffisantes pour des rotors soumis à de grands mouvements : l'hypothèse de stationnarité ne serait alors plus valable.

La théorie de vortex sillage libre est une méthode tourbillonnaire instationnaire qui présente un bon compromis entre précision de temps de calcul pour de telles turbines. Cette théorie convient aux HAWT comme aux VAWT fonctionnant en portance (elles ne sont pas adaptées, par exemple, pour les rotors Savonius). Le code *CACTUS* [4] (Code for Axial and Cross-flow TURbine Simulation) repose sur cette théorie et a été développé au SNL. *InWave* est développé à INNOSEA en collaboration avec l'Ecole Centrale Nantes [3] pour étudier la tenue à la mer de systèmes flottants. Ce papier présente le couplage effectué entre ces deux codes dans un environnement modulaire afin d'étudier les éoliennes flottantes et en particulier les VAWT. On y présente aussi les premiers travaux de vérification sur la HAWT flottante NREL 5MW sur la plateforme SPAR OC3-Hywind, comme présenté dans [5]. Les résultats du couplage développé ont été comparés à ceux obtenus avec le code FAST [6] pour des mouvements modérés de la turbine.

2. Description du modèle numérique

2.1. Solveur mécanique multi-corps et hydrodynamique

L'équation du mouvement est résolue par le solveur multi-corps *InWave* [3], développé par INNOSEA en collaboration avec l'Ecole Centrale Nantes composé d'un solveur temporel de résolution de l'équation du mouvement de systèmes multi-corps, couplé au code hydrodynamique potentiel linéaire *Nemoh* [11]. *Nemoh* calcule les efforts hydrodynamiques du premier ordre (force d'excitation et de diffraction, amortissement de radiation et masse d'eau ajoutée). Comme expliqué dans [7], l'équation du mouvement pour un système flottant peut s'écrire en théorie linéaire potentielle, en supposant des petits mouvements autour de sa position d'équilibre :

$$\begin{aligned} (M + M_{a\infty})\ddot{x}(t) + \int_0^t K_{rad}(\tau)\dot{x}(t-\tau)d\tau + (K_h + K_m)x(t) \\ = F_{FK} + \int_{-\infty}^{+\infty} K_{diff}(\tau)\eta(t-\tau)d\tau + F_{ancreages} + F_{aéro} \end{aligned}$$

Où :

- M est la matrice masse du système (masse et inerties) ;
- $M_{a\infty}$ est la masse d'eau ajoutée aux fréquences infinies ;
- $x(t)$ est le vecteur position du système (3 translations et 3 rotations) ;
- K_{rad} est la réponse impulsionnelle des efforts de radiations (efforts dus aux vagues créées par les mouvements du flotteur) ;
- K_h et K_m sont respectivement les raideurs hydrostatiques et d'ancrage ;
- F_{FK} est la force de Froude-Krylov
- K_{diff} est la réponse impulsionnelle des efforts d'excitation et de diffraction (efforts dus aux vagues incidentes sur le flotteur) ;
- $\eta(t)$ est l'élévation de surface libre.
- $F_{ancrages}$ représente les efforts appliqués au système par l'ancrage
- $F_{aéro}$ représente les efforts aérodynamiques appliqués sur la partie émergée du système

InWave a été initialement développé pour l'étude de systèmes Récupérateurs d'Énergie des Vagues (REV). Le code est basé sur un algorithme multi-corps inspiré de la robotique et développé au LHEEA permettant de considérer des degrés de liberté relatifs et donc de réduire le nombre d'équations à résoudre par rapport à l'approche cartésienne [12]. Ce type d'approche est adapté à l'éolien flottant puisqu'il est possible de considérer un seul degré de liberté entre la plateforme et le rotor, ainsi que 6 autres pour les mouvements du flotteur. *InWave* calcule également, si nécessaire, les câbles d'ancrage via le solveur quasi-statique *MAP++* [13]. On note que les moments gyroscopiques sont considérés de manière tout à fait inhérente. *InWave* est utilisable dans un environnement complet, du prétraitement au posttraitement et à la visualisation. *InWave* a été vérifié et validé par comparaison à des modèles numériques et à des résultats expérimentaux pour la partie hydrodynamique et mécanique [14] [15]. A ce stade, les corps sont supposés rigides.

2.2. Solveur aérodynamique instationnaire

2.2.1. Choix du modèle aérodynamique instationnaire

Les modèles classiquement utilisés pour l'étude des rotors d'éoliennes sont des modèles basés sur la théorie de Froude-Rankine et sur la théorie de l'élément de pale. Pour les éoliennes à axe horizontal on parle de *Blade Element Momentum*, comme pour le code *AeroDyn* [16] par exemple. Ces méthodes supposent un écoulement stationnaire de fluide parfait incompressible. Des modèles semi-empiriques peuvent par ailleurs y être implémentés afin de modéliser

- Les pertes en bout de pale ;
- Les pertes autour du HUB ;
- Les effets instationnaires dans l'écoulement incident et d'induction du sillage, par le modèle de Pitt et Peters par exemple [17] ;
- Le décrochage dynamique, par les modèles de Boeing-Vertol ou Leishman-Beddoes [4] [18] par exemple.

La méthode équivalente, basée sur la même théorie et adaptée aux VAWT se nomme Double Multiple Stream Tube (DMST). Elle consiste principalement en la division d'une VAWT en deux disques de Froude-Rankine, perpendiculaires à l'écoulement : le premier en amont et le second en aval. Les équations de conservation de quantité de mouvement sont donc écrites autour de chacun de ces deux disques, couplées à la théorie de l'élément de pale.

Les sources d'instationnarités sont toutefois multiples pour les VAWT flottantes : l'écoulement amont est instationnaire (en vitesse et en direction), les vagues interagissent avec le vent, les mouvements de la plateforme causent des irrégularités dans le vent perçu par les pales et il y a une forte interaction entre le rotor et son sillage. Ces sources sont représentées sur la Figure 1.

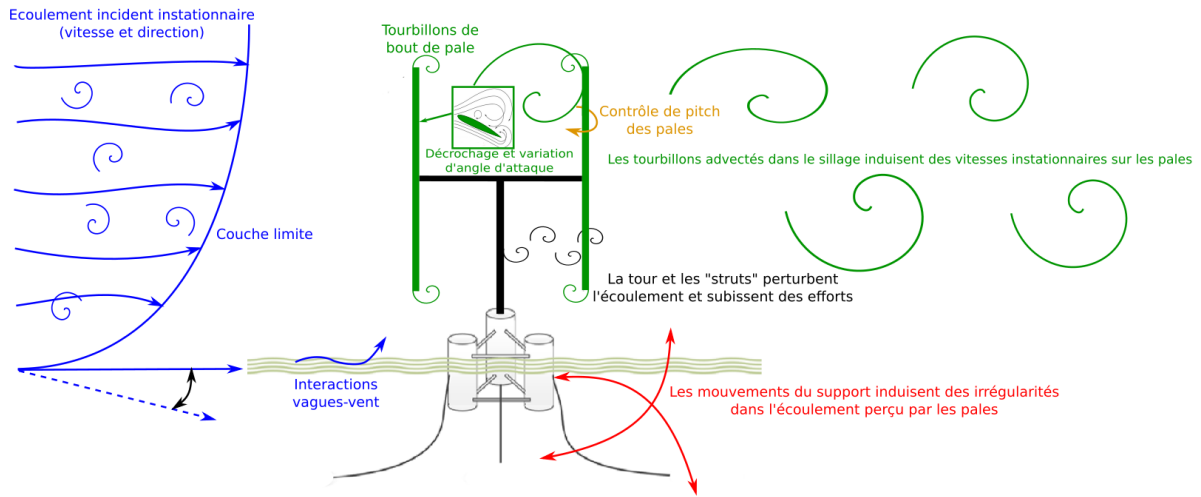


Figure 1 : Sources d'instationnarités pour une VAWT flottante (éolienne extraite de [19])

Une comparaison de différentes approches aérodynamiques est présentée dans [1], il été choisi dans la présente étude d'utiliser un modèle instationnaire de type vortex sillage libre. Ces méthodes s'appliquent autant aux HAWT qu'aux VAWT. Les temps de calculs sont en effet bien plus intéressants avec ces méthodes instationnaires qu'en résolvant les équations de Navier-Stokes dans tout le domaine fluide. Les méthodes vortex sont toutefois assez coûteuses par rapport aux méthodes stationnaires, surtout quand beaucoup de points de calcul sont à considérer dans le sillage, comme expliqué dans la suite.

On considère un fluide parfait potentiel. La théorie de l'élément de pale est utilisée, signifiant que la pale est discrétisée dans le sens de son envergure et que chacun de ses éléments sont supposés être soumis à un écoulement en deux dimensions permettant de calculer les efforts aérodynamiques à partir des coefficients aérodynamiques 2D : C_l , C_d , C_m , respectivement les coefficients de portance, de traînée et de moment. Cela implique en revanche que cette méthode ne s'applique qu'à des profils dont les coefficients aérodynamiques sont connus.

Dans la théorie de Prandtl, des structures tourbillonnaires en fer à cheval sont considérées dans le sillage de l'éolienne. Ici, un treillis de ces structures tourbillonnaires est considéré pour chacun des éléments de pales, comme présenté sur la Figure 2, extraite de [4].

Des filaments tourbillonnaires fermés sont considérés :

- Un tourbillon lié Γ_B (*bound vortex*), sur la pale (dont l'intensité est calculée par application de la condition de Kutta-Joukowski) ;
- Des structures libres, dont la vorticité est calculée (  travers le théorème de Helmholtz) :
 - o Des filaments dans la direction du sillage (*trailing vortices*) Γ_T ;
 - o Des filaments parallèles à la pale, dans le sillage (*spanwise vortices*) Γ_S ;

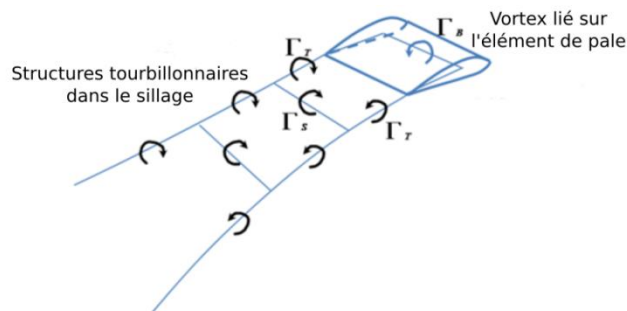


Figure 2 :  l ment de pale et ses structures tourbillonnaires associées (extraite de [4])

Chacun des filaments tourbillonnaires du sillage induisent une vitesse additionnelle à l'écoulement sur la pale, calculée à l'aide de la loi de Biot-Savart. Les points et filaments tourbillonnaires du sillage sont

enfin advectés à la vitesse locale du fluide à chaque pas de temps, les filaments tourbillonnaires gardant une vorticité constante d’après le théorème de Kelvin. Cette phase est coûteuse en termes de temps de calcul, puisque chacun des tourbillons induit une vitesse à chacun des points du sillage. A TSR élevé par exemple, beaucoup de points sont à considérer dans le sillage proche, les temps CPU peuvent donc être relativement importants.

Des modèles peuvent être implémentés pour tenir compte de phénomènes instationnaires non-inhérents à cette méthode, tels que le décrochage dynamique.

Il a été choisi d’utiliser le code *CACTUS* [4], développé au SNL. Les modèles de décrochage dynamique Boeing-Vertol (BV) et Leishman-Beddoes (LB) y ont déjà été implémentés.

2.2.2. Couplage aéro-hydrodynamique et développement de l’outil

Les codes *InWave* et *CACTUS* sont couplés dans un environnement modulaire. Le code *CACTUS* est utilisé pour le calcul des efforts aérodynamiques sur chacun des éléments de pales. Il prend pour cela en compte la vitesse du vent incident, la vitesse induite par le sillage et la vitesse de déplacement de l’élément de pale. Cette dernière composante de la vitesse est calculée par le solveur multi-corps. Les efforts aérodynamiques calculés sont alors renvoyés au solveur multi-corps pour la résolution de l’équation du mouvement, incluant les efforts hydrodynamiques et les efforts d’ancrage. Pour l’instant, tous les corps sont considérés rigides.

Un schéma du couplage est présenté sur la Figure 3. Le module de contrôle (qui n’est pas encore développé) communique lui aussi directement avec le solveur multi-corps.

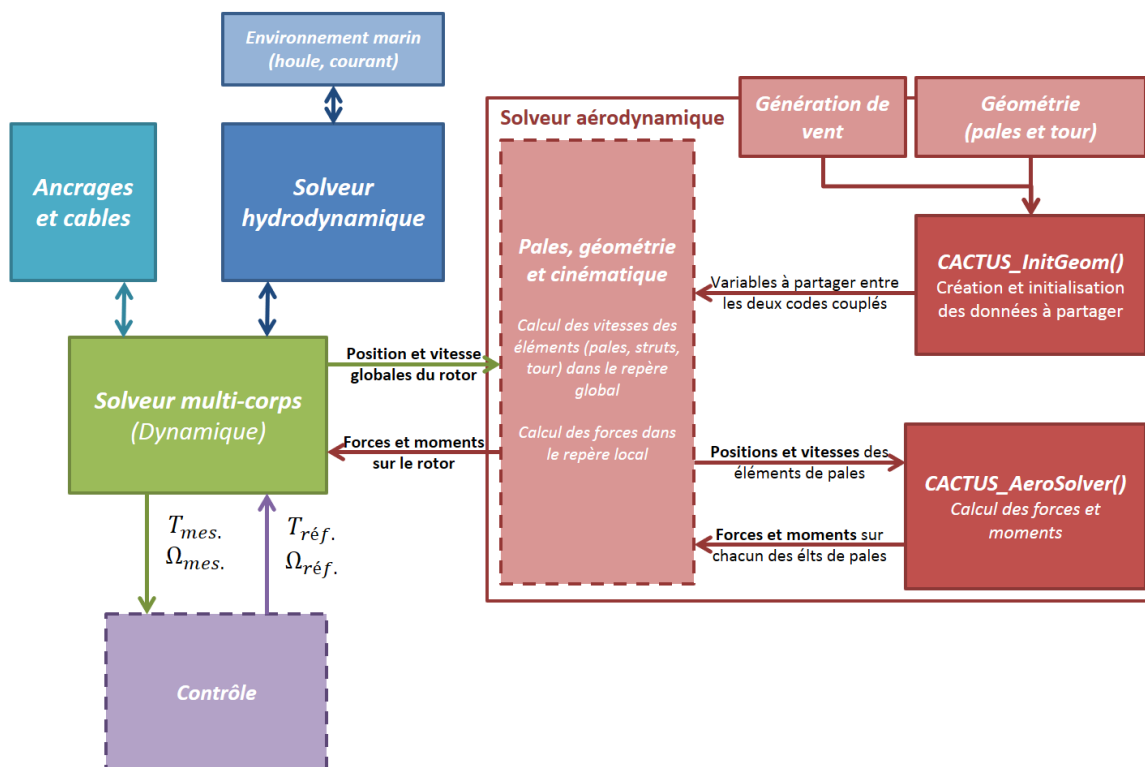


Figure 3 : Présentation de InWave et de son couplage à CACTUS

3. Vérification par comparaison avec FAST

3.1. Eolienne fixe

Le code *CACTUS* a été validé par comparaison à des données expérimentales dans [4] pour des cas de VAWT fixes. Des tests sont toutefois ici réalisés sur une HAWT fixe pour vérifier le couplage de *CACTUS* avec *InWave*. Il est choisi d’étudier la NREL 5MW développée au NREL et présentée dans [20]. Le rotor est supposé parfaitement horizontal et on ne considère pas le hub ni le m t.

La vitesse de rotation du rotor est définie constante et la vitesse de vent est variable afin d'étudier le rotor pour des *Tip Speed Ratio* (TSR) allant de 3 à 10. Les résultats obtenus avec le couplage *InWave* + *CACTUS* sont comparés avec ceux obtenus avec FAST avec une méthode *Generalized Dynamic Wake* (GDW) [16]. Les coefficients de poussée et de puissance sont présentés sur la Figure 4. Ils montrent un bon accord entre les deux méthodes pour les TSR considérés.

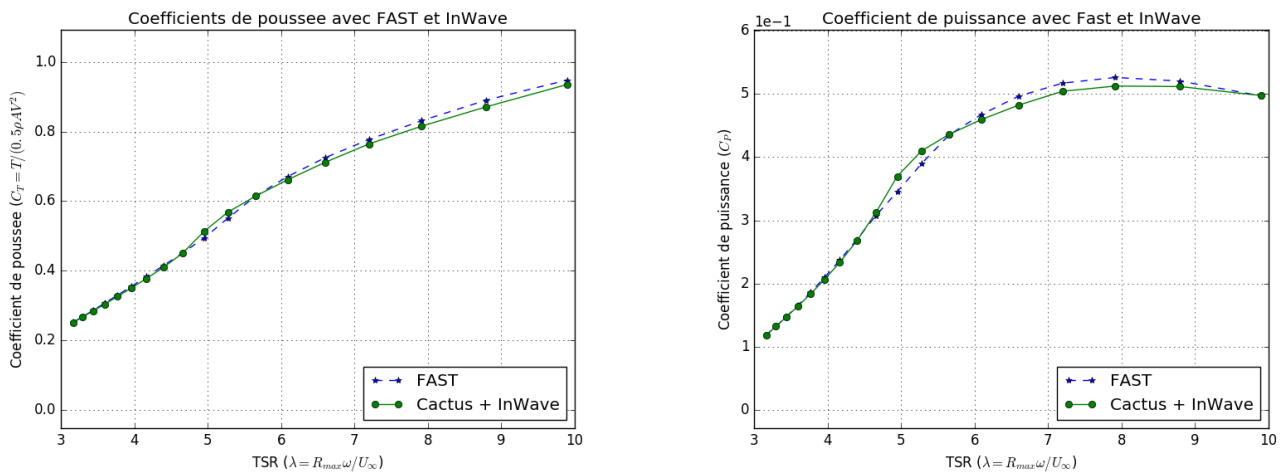


Figure 4 : Coefficients de poussée et de puissance obtenus avec FAST et InWave pour une éolienne fixe

3.2. Eolienne flottante : mouvements et efforts aérodynamiques

En l'absence de données suffisantes pour valider ce couplage sur un cas de VAWT sur un support flottant, le premier cas de validation est celui de la même HAWT installée sur un support flottant. Il s'agit du même rotor, dont l'axe fait un angle de 5° par rapport à la direction de l'écoulement, monté sur le flotteur SPAR *OC3-Hywind* comme spécifié dans [5]. Les paramètres principaux du système flottant et de ses lignes d'ancrage sont présentés dans le Tableau 1. Les coefficients hydrodynamiques (force d'excitation et de diffraction, masse ajoutée et amortissement de radiation) sont calculés avec le code potentiel linéaire Nemoh avec le maillage présenté sur la Figure 5. On y présente également un visuel de l'ensemble flottant avec son sillage. On précise que les lignes d'ancrage caténaires sont au nombre de trois, disposées à 120° autour de la SPAR, comme représenté sur la Figure 6.

Le repère choisi considère un axe horizontal Ox dans la direction du vent et un axe vertical Oz dirigé vers le haut. L'origine du repère global est à la surface libre, en $z = 0$. Seuls trois degrés de liberté sont autorisés : le cavement, le pilonnement et le tangage. Le modèle aérodynamique utilisé pour FAST est la méthode GDW, et aucun contrôle n'est considéré pour l'inclinaison des pales. Des études de convergence sur le maillage de la SPAR ainsi que sur le pas de temps des calculs et la longueur du sillage à considérer ont été menées.

Tableau 1 : Paramètres principaux du système flottant

Profondeur d'eau	320 m	Profondeur des chaumards	-70 m
Tirant d'eau	120 m	Longueur des lignes d'ancrage	902,2 m
Masse plateforme + nacelle	7956 t	Masse linéique des lignes dans l'air	77,066 kg/m
Masse rotor	110 t	Raideur axiale (EA)	384,243 MN
Hauteur du hub	90 m	Diamètre caractéristique des lignes	0,09 m

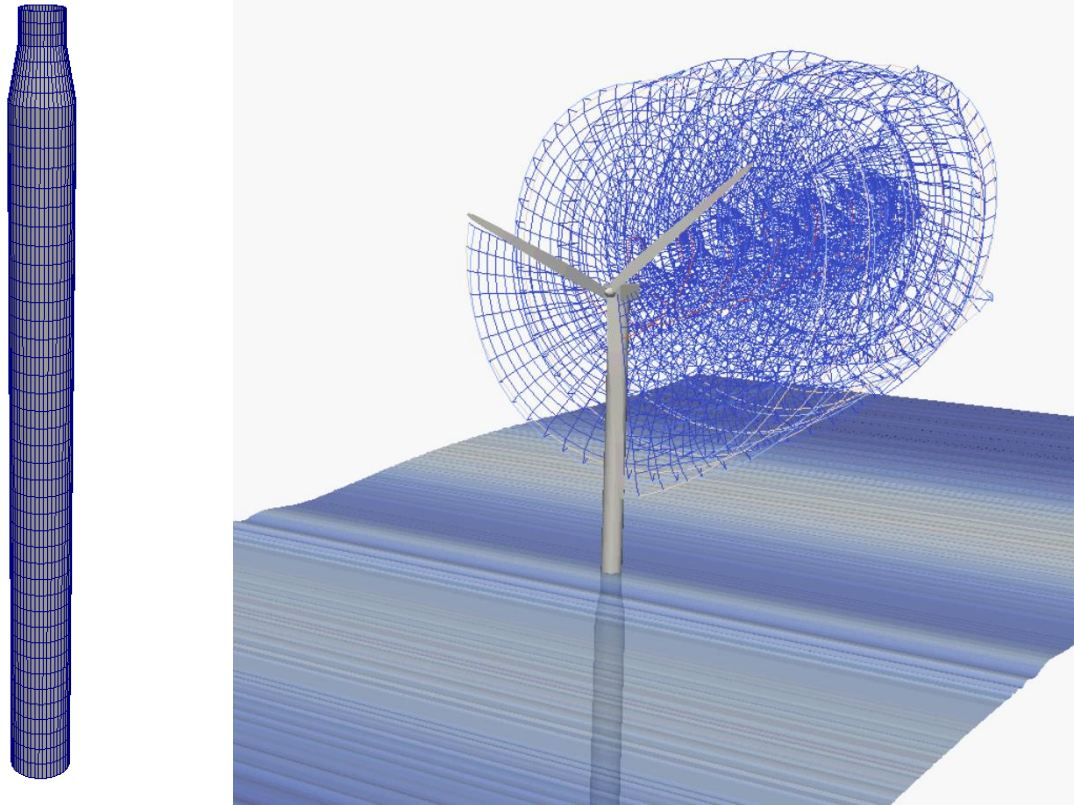


Figure 5 : Maillage utilisé pour les calculs des coefficients hydrodynamiques et visualisation de l'ensemble flottant avec sillage

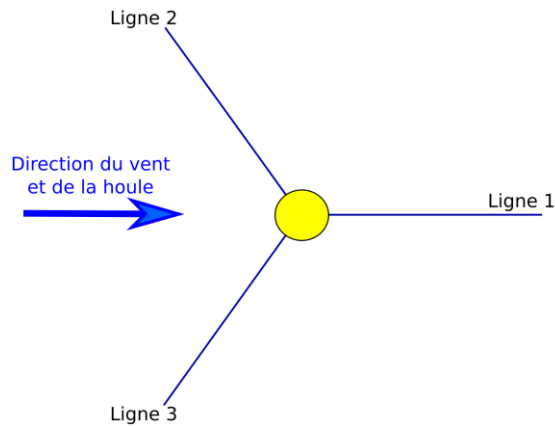


Figure 6 : Lignes d'ancrage et environnement

3.2.1. Etude sans vent

Dans un premier temps, les séries temporelles de mouvements sont étudiées sans aucun vent, ni rotation du rotor. La plateforme a trois degrés de liberté : cavement, pilonnement et tangage. La rotation du rotor est bloquée. Le flotteur est soumis à la gravité, aux efforts hydrodynamiques : théorie potentielle linéaire (diffraction et radiation au 1^{er} ordre) ainsi qu'un terme de traînée quadratique de Morison sur la SPAR ($C_d = 0,60$) et aux efforts d'ancrage. Pour le calcul des efforts de traînée de Morison, la SPAR est discrétisée sur sa longueur en plusieurs éléments. Les vitesses relatives entre chacun de ces éléments et le fluide sont calculées à chaque pas de temps pour déterminer la traînée transversale.

Le système flottant est successivement soumis à des houles régulières d'amplitude $0,1m$ et de périodes $5 s$ à $35 s$. Une analyse harmonique menée sur les séries temporelles de mouvement permet d'extraire les harmoniques à la fréquence de houle et de tracer les fonctions de transferts de mouvement (RAO). Les RAO pour les degrés de liberté de cavement, pilonnement et tangage sont tracées sur la Figure 7. Les RAO de mouvements sont bien en accord sur l'ensemble des périodes de vagues étudiées.

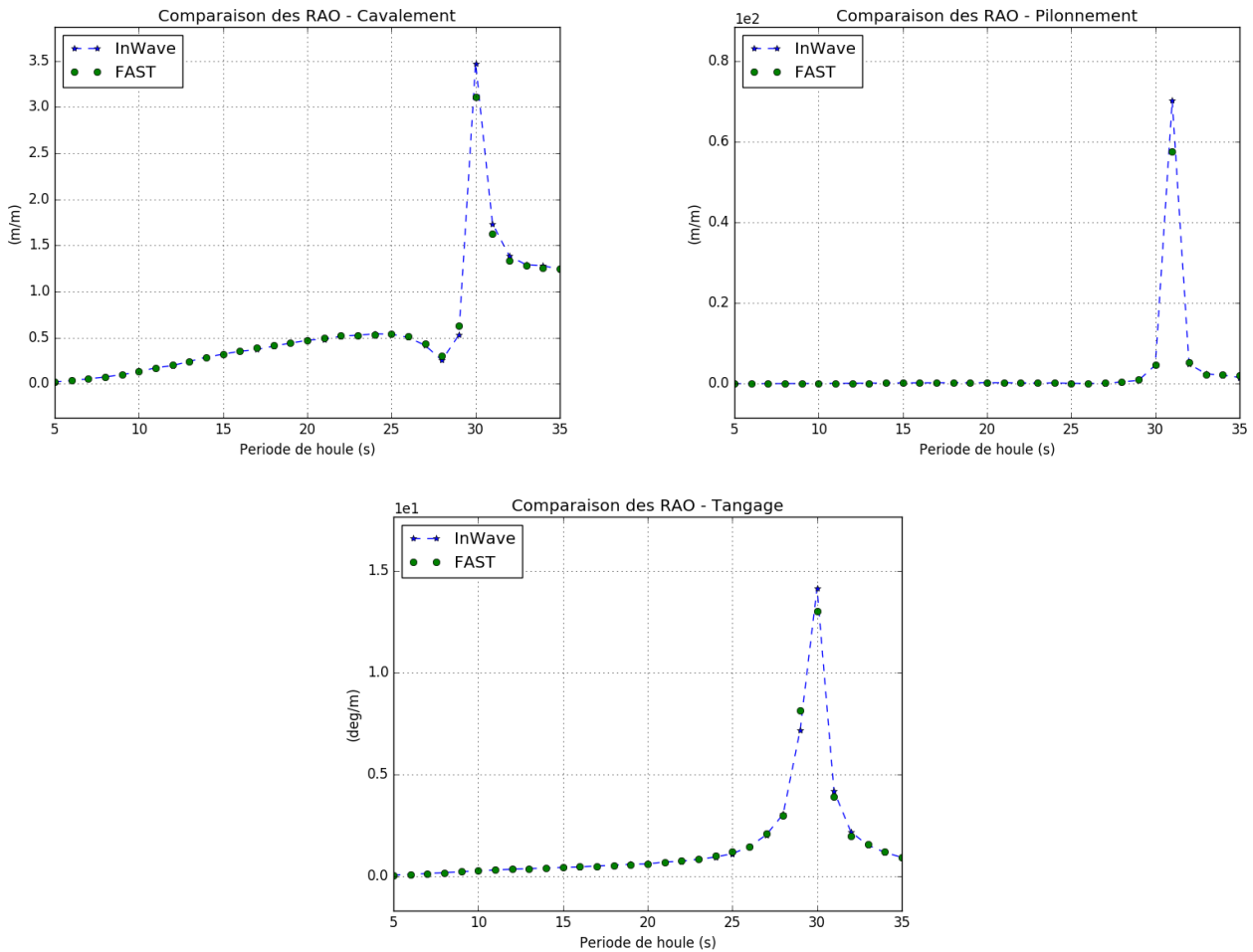


Figure 7 : RAO de mouvement (cavalement, pilonnement et tangage) pour l'éolienne sans vent

3.2.2. Etude avec vent : séries temporelles

La parallélisation du solveur aérodynamique n'étant pas encore réalisée, les simulations prenant en compte le vent sont très coûteuses en temps CPU comme expliqué dans la partie 2.2.1. Pour garder un temps de calcul raisonnable sur des simulations longues (plus de 2000s pour sortir du régime transitoire), il est nécessaire de limiter le nombre de points dans le sillage. On applique donc ici un vent constant $U_\infty = 18 \text{ m.s}^{-1}$ à l'éolienne, pour une vitesse de rotation de **12 RPM** (soit un TSR = 4,4).

Les séries temporelles de mouvements et d'efforts aérodynamiques sur le rotor sont d'abord étudiées pour deux états de mer différents. Pour des mouvements modérés, c'est-à-dire pour des états de mer calmes afin de ne pas trop s'éloigner des hypothèses de la théorie BEM. On devrait donc avoir un bon accord entre *InWave* et FAST. L'orientation des pales est fixe. Enfin, ni le hub ni le mât ne sont considérés.

Les deux vagues régulières choisies ont une amplitude $A = 1\text{m}$ et des périodes de houle de $T = 20 \text{ s}$ et 10 s . Les séries temporelles sont tracées sur la Figure 8. Les efforts hydrostatiques dans *InWave* sont ici calculés de manière non-linéaire. Ce qui signifie que le champ de pression hydrostatique est calculé à chaque pas de temps en prenant en compte les déplacements du flotteur. Dans le module hydrodynamique de FAST, *HydroDyn*, l'hydrostatique est linéaire comme expliqué dans [7].

A $T = 20 \text{ s}$, on remarque un bon accord sur les coefficients aérodynamiques avec des valeurs identiques concernant les coefficients de poussée et de puissance. On a un bon accord pour les mouvements, une faible différence s'observe sur le pilonnement (12,2% d'écart en amplitude) et le tangage (0,4% d'écart sur la valeur moyenne). Ceci est expliqué par la différence de modèles dans les efforts hydrostatiques.

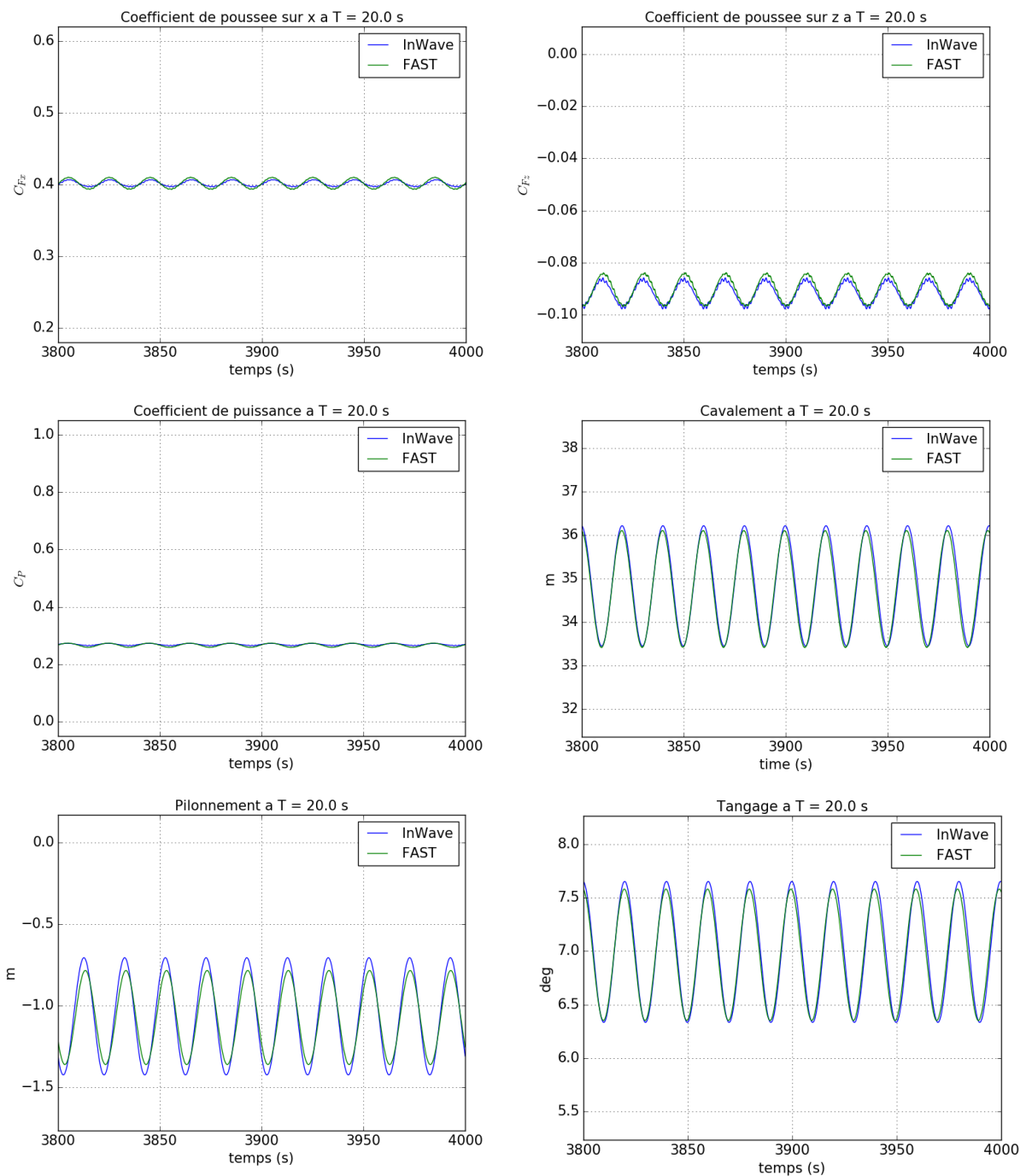


Figure 8 : Séries temporelles obtenues à $T=20s$, $A=1m$ et un vent de $18m/s$

A $T = 10 s$, on observe un bon accord entre les efforts aérodynamiques. Pour les mouvements du système flottant, on a là aussi un bon accord entre les deux modèles, excepté pour le tangage : les amplitudes sont les mêmes mais on retrouve le même écart sur la valeur moyenne que précédemment ($0,4^\circ$), a priori dû aux différences entre les modèles hydrostatiques.

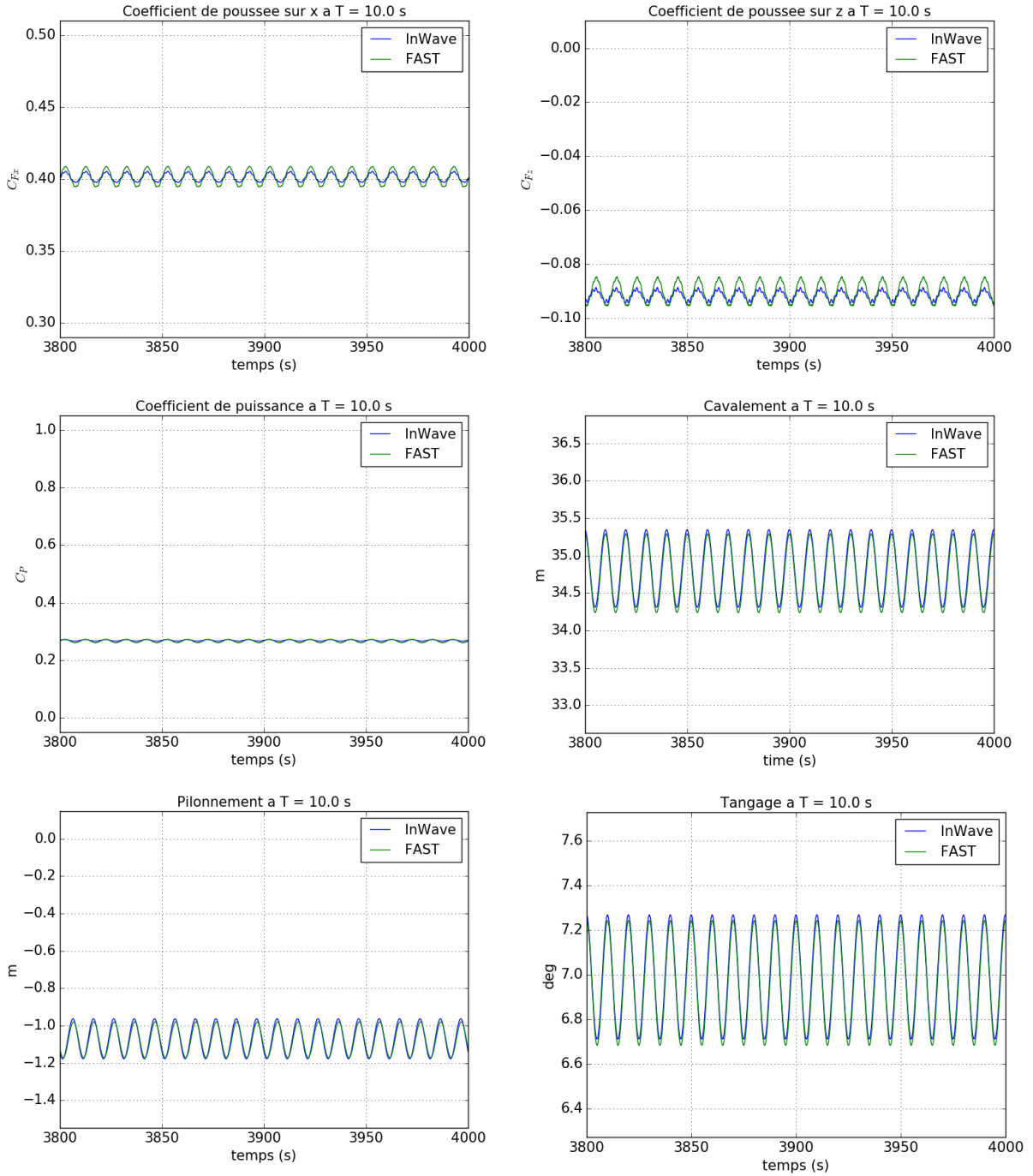


Figure 9 : Séries temporelles obtenues à $T=10s$, $A=1m$ et un vent de $18m/s$

On définit l'écart relatif sur la donnée X comme suit :

$$\epsilon = \frac{|X_{InWave} - X_{FAST}|}{|X_{FAST}|}$$

Le Tableau 2 présente les écarts relatifs entre les valeurs moyennes et les amplitudes des deux modèles pour les deux cas présentés. Les écarts sur les amplitudes des efforts aérodynamiques calculés par les deux modèles peuvent paraître grands, mais l'écart relatif entre les valeurs absolues des coefficients de pousse n'excèdent pas $\epsilon = \frac{|C_{TxInWave} - C_{TxFAST}|}{|C_{TxFAST}|} = \frac{|0.406 - 0.41|}{0.41} < 1\%$.

De plus, comme expliqué dans [16], la méthode GDW utilisée pour les efforts aérodynamiques suppose un écoulement stationnaire sur un rotor dans le plan vertical. Or ici, pour un tangage moyen de 7° auxquels on ajoute les 5° d'inclinaison du rotor, le plan de rotation du rotor est à 12° par rapport au plan vertical, ce qui écarte le cas présent du cadre théorique de la méthode.

Les différences sur le pilonnement et le tangage sont directement liées aux différences approches pour le calcul du rappel hydrostatique.

Tableau 2 : Ecart relatifs entre les deux modèles pour les cas présentés

	Ecart relatifs à T=20s		Ecart relatifs à T=10s	
	Valeur moyenne	Amplitude	Valeur moyenne	Amplitude
Force aéro. sur x	0%	20%	0.1%	22.6%
Force aéro. sur z	1.5%	4.4%	1.5%	22.1%
Coefficient de puissance	1%	20%	0.9%	24%
Cavement	0.2%	1.5%	0.2%	0.7%
Pilonnement	0.7%	12.2%	0.5%	5.7%
Tangage	0.4%	3.6%	0.4%	0.2%

4. Conclusion

Le couplage entre *InWave*, un logiciel de tenue à la mer, et *CACTUS*, un solveur aérodynamique instationnaire, a été présenté dans cet article. Un des intérêts principaux de ce couplage est qu'il permet d'étudier les éoliennes flottantes à axe horizontal, aussi bien que les éoliennes à axe vertical. Le couplage a été vérifié par comparaison avec le code *FAST* dans des mouvements modérés pour lesquels *FAST* est adapté. Le travail de validation va se poursuivre sur le cas de la HAWT présenté. Des calculs avec des amplitudes plus grandes en tangage sont prévus pour observer le comportement des deux modèles. Le hub et le mât seront pris en compte, ainsi que le phénomène de décrochage dynamique pour pouvoir comparer le modèle aux résultats du projet OC3 [21].

Après validation de ce code, l'objectif est de se concentrer sur la tenue à la mer des VAWT flottantes. Le moment de réaction dû à la génératrice que doit contenir l'ancrage sur le système est inhérent et très particulier à ce type d'éolienne. Il peut par ailleurs entraîner une fatigue importante des lignes d'ancrage. Pour étudier ce point critique, des lois de contrôle seront développées et testées avec le code présenté dans ce papier.

5. Références

6.

- [1] M. Borg, A. Shires et M. Collu, «Offshore floating vertical axis wind turbines, dynamic modelling state of the art. Part I: Aerodynamics,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1214-1225, 2014.
- [2] M. Borg et M. Collu, «A comparison between the dynamics of horizontal and vertical axis offshore floating wind turbines,» *Phil. Trans. R. Soc. A 373*, 2015.
- [3] A. Combourieu, M. Philippe, F. Rongère et A. Babarit, «InWave: a new flexible tool dedicated to Wave Energy Converters,» *In Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2014, June 8-13, 2014, San Francisco, California, USA*, 2014.
- [4] J. C. Murray et M. Barone, «The development of CACTUS, a wind and marine turbine performance simulation code,» *in proceedings of 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2011.
- [5] J. Jonkman, «Definition of the Floating System for Phase IV of OC3. Technical Report,» *National Renewable Energy Laboratory (NREL) - Technical Report NREL/TP-500-47535*, 2010.
- [6] National Renewable Energy Laboratory (NREL) (USA), «NWTC Information portal - FAST,» [En ligne]. Available: <https://nwtc.nrel.gov/FAST>. [Accès le 2015 11 2015].

- [7] B. Molin, «Hydrodynamique des structures offshore,» Editions TECHNIP, 2002.
- [8] M. Philippe, A. Courbois, A. Babarit, F. Bonnefoy, J.-M. Rousset et P. Ferrant, «Comparison of Simulation and Tank Test Results of a Semi-Submersible Floating Wind Turbine Under Wind and Wave Loads, OMAE2013-11271,» *Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering OMAE2013 June 9-14, 2013, Nantes, France, 2013.*
- [9] J. R. Browning, J. Jonkman, A. Robertson et A. J. Goupee , «Calibration and validation of a spar-type floating offshore wind turbine model using the FAST dynamic simulation tool,» *Journal of Physics, Conference Series 555, The Science of Making Torque From Wind Conference, 2014.*
- [10] H. Beri et Y. Yao, «Double Multiple Stream Tube model and numerical analysis of vertical axis wind turbine,» *Energy and Power Engineering*, n° 13, pp. 262-270, 2011.
- [11] A. Babarit et G. Delhommeau, «Theoretical and numerical aspects of the open source BEM solver NEMOH,» *In Proceedings of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference 6-11th Sept 2015, Nantes, France, 2015.*
- [12] F. Rongère et A. H. Clément, «Systematic dynamic modeling and simulation of multibody offshore structures: application to wave energy converters,» *Proceedings of the ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2013, June 9-14, 2013, Nantes, France, 2013.*
- [13] NREL - NWTC Information Portal, «MAP+,» NREL, [En ligne]. Available: <https://nwtc.nrel.gov/MAP>. [Accès le 29 06 2016].
- [14] V. Leroy, A. Combourieu, M. Philippe, A. Babarit et F. Rongère, «Benchmarking of the new design tool InWave on a selection of wave energy converters from NumWEC project,» *In Proceedings of the 2nd Asian Wave and Tidal Energy Conference 28-30th July 2014, Tokyo, Japan, 2014.*
- [15] A. Combourieu, M. Philippe, A. Larivain et J. Espedal, «Experimental Validation of InWave, a Numerical Design Tool for WECs,» *In Proceedings of the 11th European Wave and Tidal Energy Conference 6-11th Sept 2015, Nantes, France, 2015.*
- [16] P. J. Moriarty et A. C. Hansen, «AeroDyn Theory Manual,» 2005.
- [17] D. M. Pitt et D. A. Peters, «Rotor dynamic inflow derivatives and time constants from various inflow models,» *In Proceedings of 9th European Rotorcraft Forum, 1983.*
- [18] A. Bjorck, «DYNSTALL: subroutine package with a dynamic stall model,» 2000.
- [19] M. Borg, M. Collu et A. Kolios, «Offshore floating vertical axis wind turbines, dynamics modelling state of the art. Part II: Mooring line and structural dynamics,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1226-1234, 2014.
- [20] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial et G. Scott, «Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development. Technical Report NREL/TP-500-39060,» *National Renewable Energy Laboratory, 2009.*
- [21] J. Jonkman et W. Musial, «Offshore Code Comparison Collaboration (OC3) for IEA Task 23 Offshore Wind Technology and Deployment,» *Technical Report NREL/TP-5000-48191, 2010.*
- [22] M. Philippe , «Couplages aéro-hydrodynamiques pour l'étude de la tenue à la mer des éoliennes offshore flottantes,» *Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Nantes, 2012.*