



**HAL**  
open science

## **Simulation et contrôle de FOWT à l'aide de la co-simulation OpenFAST/Matlab Guide de l'utilisateur**

Seydali Ferahtia, Mourad Aït-Ahmed, Azeddine Houari, Mohamed  
Machmoum

### ► **To cite this version:**

Seydali Ferahtia, Mourad Aït-Ahmed, Azeddine Houari, Mohamed Machmoum. Simulation et contrôle de FOWT à l'aide de la co-simulation OpenFAST/Matlab Guide de l'utilisateur. IREENA - Institut de Recherche sur l'Energie Electrique de Nantes-Atlantique (IREENA) EA 4642. 2024. hal-04858236

**HAL Id: hal-04858236**

**<https://hal.science/hal-04858236v1>**

Submitted on 29 Dec 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Simulation et contrôle de FOWT à l'aide de la co-simulation OpenFAST/Matlab

---

Guide de l'utilisateur

---

**Ferahtia Seydali**

**Mourad Ait-Ahmed**

**Azeddine Houari**

**Machmoum Mohammed**

2024



# Table des matières

<b>Table des matières.....</b>	<b>ii</b>
<b>Introduction.....</b>	<b>1</b>
1- Présentation .....	1
2- OpenFAST.....	2
2-1- Structuration des modèles multiphysiques des éoliennes flottantes sous l'interface logicielle Open-Fast .....	2
2-2- Configuration de la co-simulation OpenFast/MATLAB-Simulink.....	5
2-3- Première simulation .....	6
3- Les sorties .....	9
<b>Modélisation FOWT – Notions de base .....</b>	<b>11</b>
1- Modélisation d'éoliennes.....	11
1-1- Modèle aérodynamique: .....	11
1-2- Modèle mécanique (boîte de vitesse de transmission) : .....	13
1-3- Linéarisation du modèle : .....	15
2- Conception de contrôle.....	15
2-1- Objectifs du contrôle .....	15
2-3- Contrôleur de région II (MPPT) : .....	16
2-4- Contrôleur de la région III.....	17
<b>Références .....</b>	<b>20</b>

---

# Introduction

## 1- Présentation

Récemment, les coûts de l'énergie éolienne ont diminué de manière significative en raison de la taille accrue des rotors, en particulier pour les éoliennes flottantes en mer (FOWTs). Les FOWTs sont installés dans des régions océaniques éloignées des côtes, où des plateformes flottantes les ancrent au fond marin, leur permettant de fonctionner à des vitesses de vent plus robustes et constantes avec des pales plus grandes. Ces éoliennes minimisent l'impact visuel, réduisent les émissions de carbone, et luttent contre le changement climatique tout en alimentant les villes côtières. Cependant, ces éoliennes géantes introduisent des défis, notamment en ce qui concerne la stabilité des plateformes flottantes et la qualité de puissance produite. L'augmentation de la longueur des pales entraîne une augmentation de leurs déflexions et des déviations significatives de la zone balayée par rapport au plan du rotor. De plus, des pales flexibles peuvent augmenter l'instabilité aérodynamique et la complexité, nécessitant des modèles dynamiques avancés pour résoudre ces problèmes. De plus, la flexibilité de la tour et les mouvements de la plateforme flottante peuvent induire des mouvements supplémentaires qui peuvent affecter les performances. Par conséquent, établir un modèle approprié pour reproduire le comportement du FOWT et concevoir des contrôleurs robustes est obligatoire. Comme illustré à la figure 1, le modèle FOWT comprend des sous-modèles complexes et hautement non linéaires, y compris :

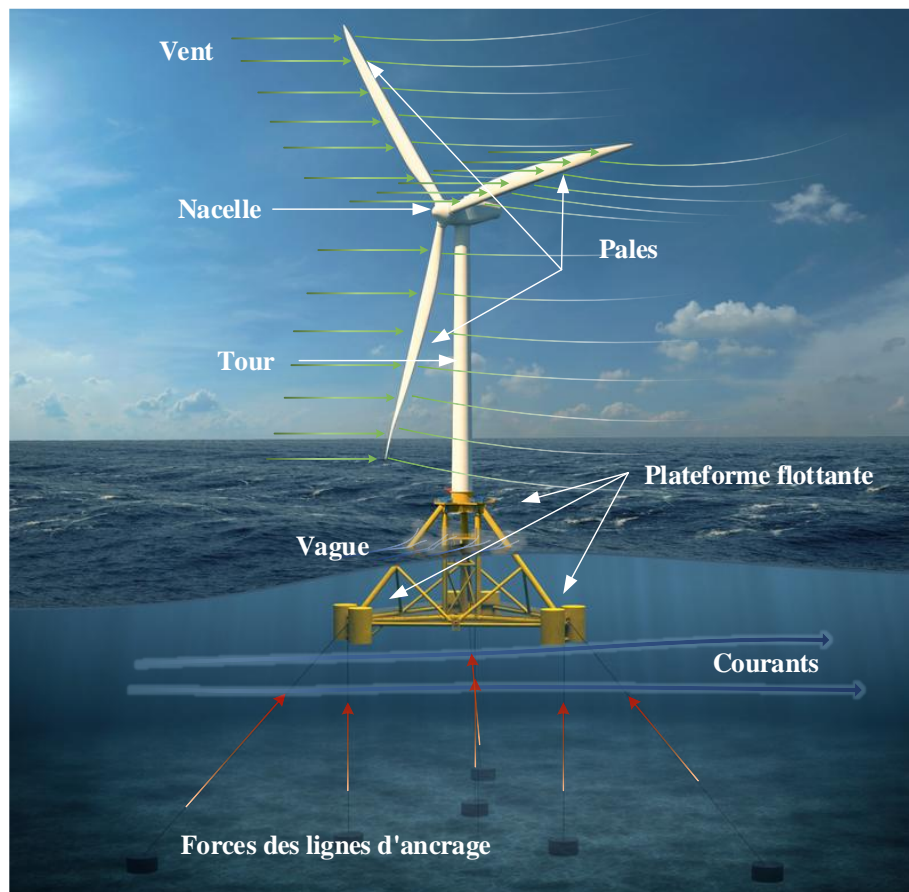


Figure 1 – Représentation de FOWT

- 
- Effets aérodynamiques : concevoir et analyser les flux d'air autour des pales et de leurs formes est important pour maximiser la capture d'énergie tout en minimisant la traînée et la turbulence. Ces modèles aident à prédire les performances dans des conditions de vent variables.
  - Effets hydrodynamiques : la simulation précise de l'interaction entre la plateforme flottante et les hydrodynamiques (vagues et courants) est essentielle, car la plateforme flottante doit s'adapter à divers environnements marins.
  - Dynamiques structurelles : la turbine et la plateforme doivent être conçues pour résister à diverses charges environnementales et garantir durabilité et stabilité.
  - Systèmes d'amarrage : ce modèle est nécessaire pour comprendre comment le fond marin interagit avec la structure flottante et comment cela affecte la stabilité et la performance.
  - Systèmes de contrôle : développer des stratégies de contrôle efficaces pour maintenir la stabilité et optimiser la performance et la durée de vie de la turbine face aux conditions environnementales changeantes est un défi. Cela comprend la coordination de l'orientation des pales de la turbine et de la plateforme.

Le Laboratoire National des Énergies Renouvelables (NREL) a développé le logiciel OpenFAST pour simuler avec précision le comportement dynamique des modèles FOWT tout en prenant en compte les parties mentionnées ci-dessus. OpenFAST est un outil multi-physique qui simule la réponse dynamique des éoliennes. Il combine des modules informatiques pour la dynamique structurelle, la dynamique des systèmes de contrôle et électriques, et l'hydrodynamique. Cela vous permet de réaliser des simulations aéro-hydro-servo-élastiques non linéaires couplées dans le domaine temporel. Il peut analyser les configurations des éoliennes, y compris les rotors à axe horizontal à deux ou trois pales, la régulation de l'angle de calage, les moyeux et les tours.

## 2- OpenFAST

OpenFAST est un outil de simulation d'éolienne open-source conçue pour reproduire le comportement des éoliennes sur la base de modèles d'ingénierie aéro-hydro-servo-élastiques, afin de fournir une plate-forme de simulation haute-fidélité [1]. Cet outil a été créé sur la base de l'outil de simulation FAST (fatigue, aérodynamique, structure et turbulence) publié par le NREL.

### 2-1- Structuration des modèles multiphysiques des éoliennes flottantes sous l'interface logicielle Open-Fast

Le modèle FOWT fourni par OpenFAST peut être divisé en trois niveaux : conditions externes, charges appliquées et dynamique structurelle, comme illustré dans la figure 2. Les principaux fichiers d'OpenFAST sont :

- **Fichier principal OpenFAST (.fst):** ce fichier charge les paramètres de simulation et les sous-codes requis, notamment :
  - *Simulation control:* fournit les paramètres de simulation, tels que le temps d'échantillonnage (DT) et le temps de simulation (TMax).
  - *Feature switches and flags:* sélection du code source pour chaque partie.
  - *Environmental conditions:* initialise les conditions environnementales.
  - *Input files:* cette partie charge le sous-code de chaque partie.
  - *Output:* active ou désactive la création des résultats de simulation (.sum, .out et .outb).

- *Linearization*: active ou désactive la fonction de linéarisation (uniquement avec une vitesse de vent constante sans vagues).
- *Visualization*: active ou désactive la création de données VTK qui sont utilisées pour réaliser une animation du FOWT (un logiciel externe est requis, 'Paraview').

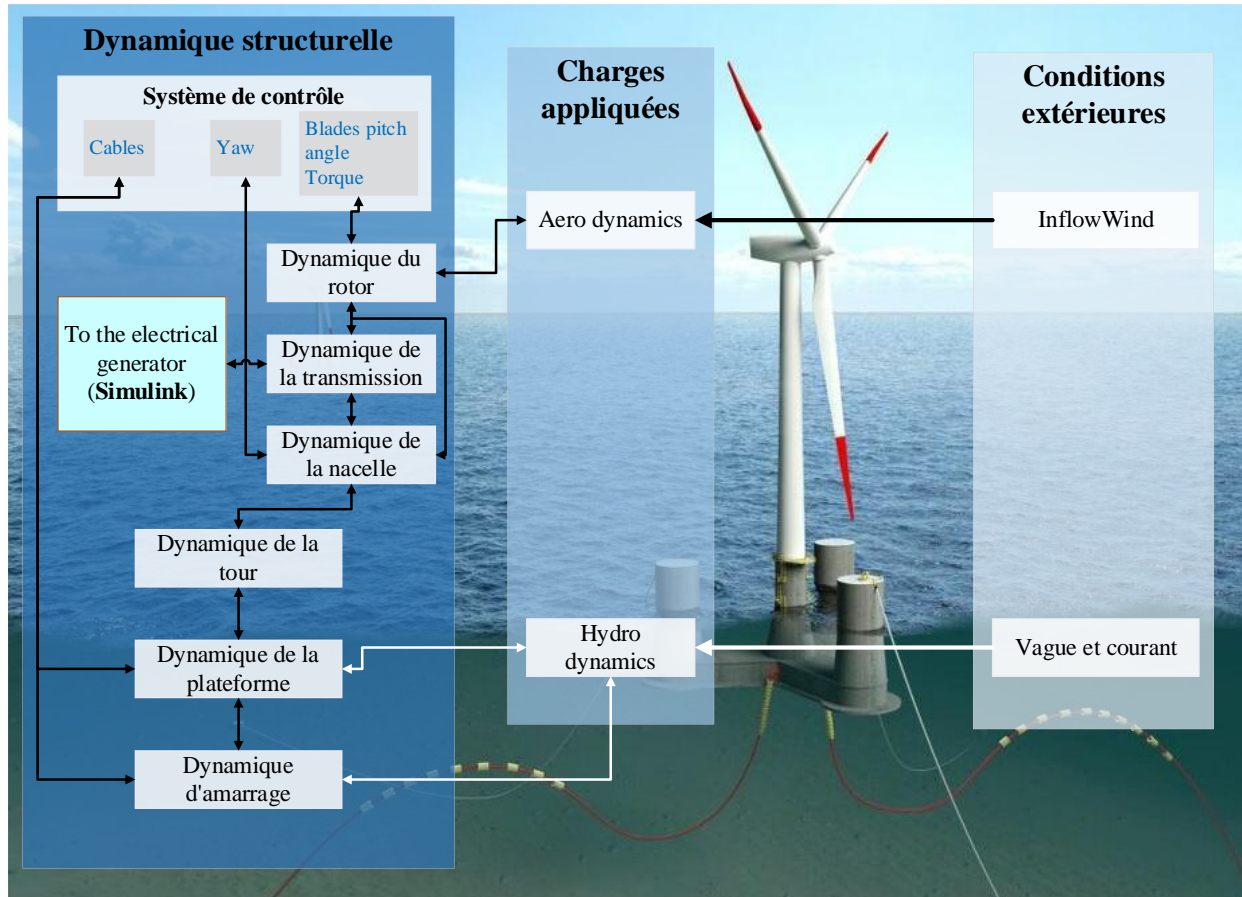


Figure 2 – Schéma des principales parties d'OpenFAST

- **Fichier de paramètres structurels (xx\_ElastoDyn.dat)**: les principaux paramètres de l'éolienne sont inclus dans ce fichier, tels que :
  - *Degrees of freedom (DOF)*: activer ou désactiver une degré de liberté.
  - *Initial conditions*: les conditions initiales telles que vitesse, positions, déflexions....
  - *Turbine configuration*: configuration de la turbine, y compris les pales, la tour, la transmission ....
  - *Mass and inertia*: arbres, plate-forme, masses des nacelles et inertie, masses des pales.
  - *Blade*: les fichiers de géométrie des pales (à charger à partir de fichiers externes).
  - *Rotor-teeter*: rotor-bascule pour éoliennes à 2 pales.
  - *Drivetrain*: paramètres de la boîte de vitesses.
  - *Furling*: en cas de propriétés supplémentaires pour la turbine enrrouleuse.
  - *Tower*: fichiers de géométrie de tour (à charger à partir de fichiers externes).
  - *Outputs*: les sorties générées par ce fichier sont mentionnées dans cette section.
- **Fichier de profil de vent extérieur (xx\_InflowWind.dat)**: ce fichier inclut un indicateur de commutation pour le type de vent 'WindType', tel que :

- 
- *Steady* (1): la vitesse du vent est constante ‘=HWindSpeed’.
  - *Uniform* (2): la vitesse du vent est variable en fonction du profil conçu et chargé à partir d'un fichier externe (.wnd ou .hh). Ces fichiers peuvent être modifiés par l'utilisateur à l'aide de l'application ‘*notebook*’.
  - *Binary TurbSim* (3): la vitesse du vent est variable en fonction du profil chargé depuis un autre fichier (.bts). Ces fichiers sont générés à l'aide du logiciel ‘*TurbSim*’ en fonction de plusieurs paramètres météorologiques.
- **Fichier de de l'aerodynamique (xx\_AeroDyn15.dat):** ce fichier inclut les modèles de calcul de la puissance aérodynamique qui comprennent la théorie Blade-Element/Momentum (BEM), la théorie Dynamic BEM (DBEM), et la théorie des cOnvecting LAgrangian Filaments (OLAF). Cela nécessite également les informations sur les profils aérodynamiques pour chaque pale. La géométrie des pales (propriétés distribuées des pales) est fournie dans le fichier xx\_Blade.dat, tandis que les informations sur l'aile (angle d'attaque, coefficient de moment de tangage, coefficients de portance et de traînée) sont fournies dans les fichiers xx\_CylinderX.dat et xx\_DUXX\_A17dat.
  - **Fichier de profils de vagues et d'hydrodynamique (xx\_HydroDyn.dat):** ce fichier inclut un indicateur de commutation pour définir le modèle cinématique de la vague incidente et des modes de courant ainsi que les paramètres des charges appliquées sur la plateforme flottante. Pour les FOWTs, l'effet des courants est faible, donc le paramètre principal dans ce fichier est le mode d'onde 'WaveMod'; les principaux modes sont :
    - *None* (0): pas de vagues, eau calme.
    - *Regular* (1): ondes périodiques.
    - *JONSWAP/Pierson-Moskowitz spectrum* (2): profil irrégulier basé sur l'équation JONSWAP.
  - **Fichier de contrôle (xx\_ServoDyn.dat):** Ce module permet de contrôler différents actionneurs, tels que l'angle de tangage des pales et le couple du générateur. Les éléments suivants doivent être ajustés pour la co-simulation avec MATLAB/Simulink. :
    - Mode de contrôle de l'angle de tangage (*PCMode*): =5.
    - Mode de contrôle à vitesse variable (*VSContrl*): = 5.
  - **Fichier des amarres (xx\_FEAMooring.dat/xx\_Mooring.dat/xx\_MAP.dat):** Ce module fournit les différentes propriétés des lignes d'amarrage attachées à la plateforme, telles que le type de ligne, le matériau, le diamètre et la longueur. Il est choisi en fonction du type de plateforme. Chaque fichier inclut certains paramètres et propriétés pour l'interaction sol-structure.

La hiérarchie des codes est illustrée dans la figure 3.

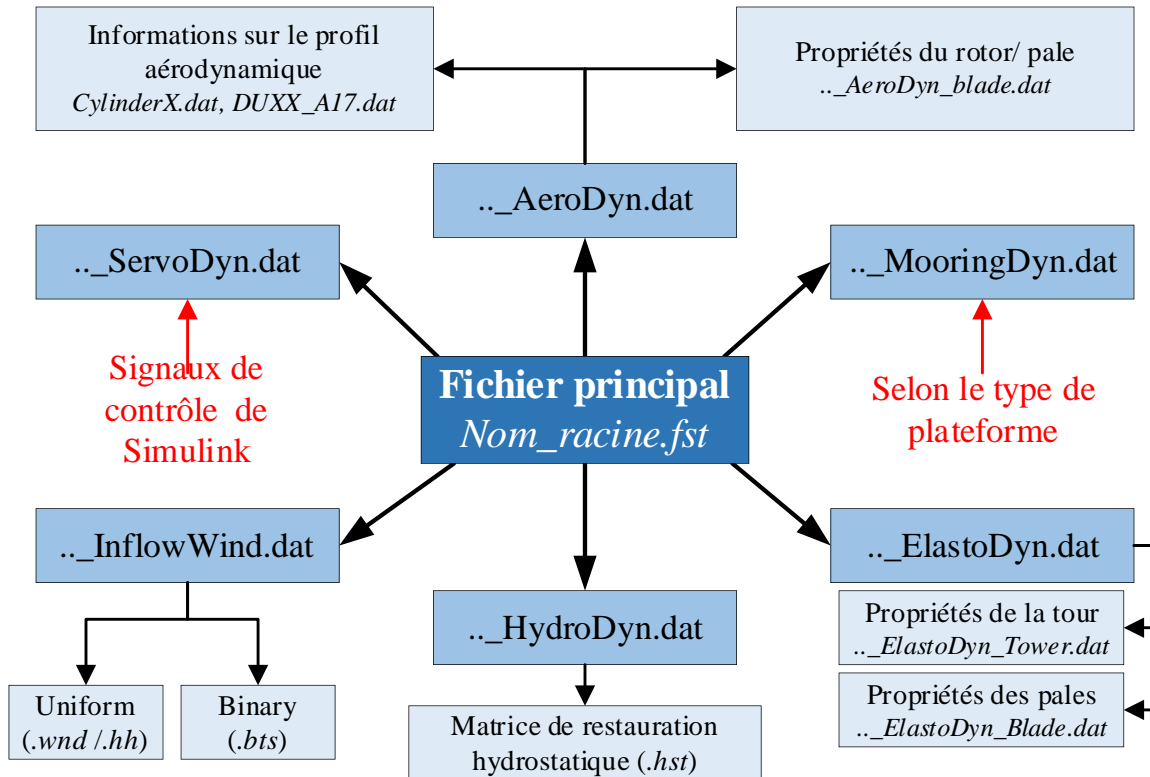


Figure 3 – Codes hierarchy in OpenFAST

D'autre part, OpenFAST a les sorties suivantes :

Tableau 1 - Liste des fichiers de sortie

Fichier généré	Extension	Format	Description
Résumé	.sum	Txte	Fichiers de rapport générés pour chaque partie. Ces rapports incluent un résumé de la simulation.
Time-series	.out	Txte	Matrice de sortie de toutes les sorties numériques mentionnées à la fin de chaque partie.
	.outb	Binaire	Sortie tabulaire temporelle au format binaire.
Linéarisation	.lin	Txte	Matrices de sortie linéarisée.
Visualisation	.vtp	VTK XML (text)	Fichier de données polygonales pour la visualisation et l'animation.

**Remarque :** si un certain module reste inactif pendant une simulation, les exécutions des sous-routines de ce module sont exclues et les entrées/sorties du module ne sont ni établies ni utilisées.

## 2-2- Configuration de la co-simulation OpenFast/MATLAB-Simulink

**Étape 01 - Téléchargez OpenFAST :** OpenFAST est un logiciel en accès libre qui peut être téléchargé gratuitement depuis GitHub : <https://github.com/OpenFAST/openfast>.

**Étape 02- Téléchargez le fichier build :** vous pouvez le trouver sur le lien suivant: <https://github.com/sido28/OpenFAST-build-folder-.git>.



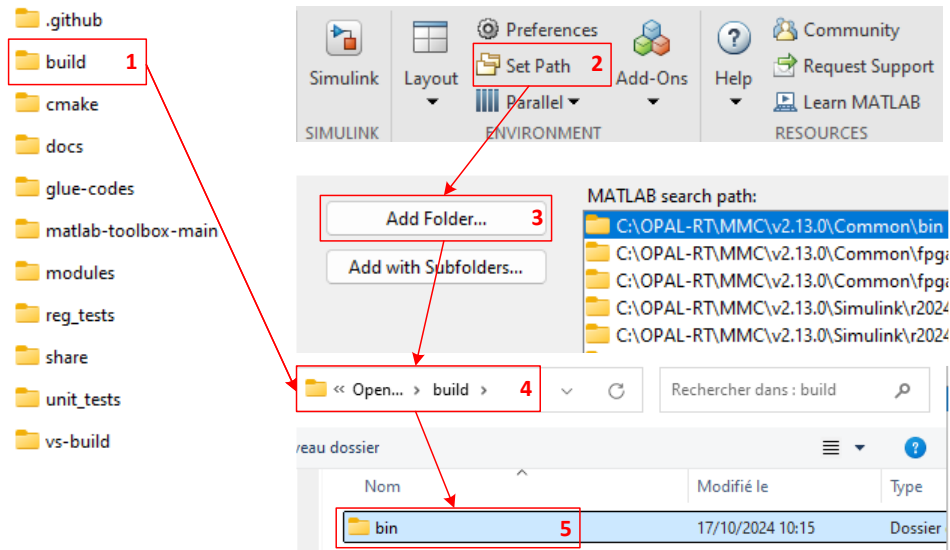


Figure 4 – Couplage d'OpenFAST avec Matlab

**Étape 03- Ajouter un dossier de build aux chemins MATLAB:** Après avoir téléchargé ces dossiers :

- 1- Copier et coller dans le dossier principal d'OpenFAST,
- 2- Ouvrez Matlab et sélectionnez l'option Définir le chemin (Set Path),
- 3- Sélectionnez Ajouter un dossier (Add Folder).
- 4- Ouvrez le répertoire du dossier bin inclus dans le dossier build, comme illustré à la figure 4.
- 5- Enfin, choisissez ce dossier et enregistrez les modifications.

### 2-3- Première simulation

Après avoir couplé OpenFAST avec Matlab, une première simulation doit être effectuée pour vérifier la communication entre les deux logiciels. Deux exemples de modèles (OpenLoop et Test01\_SIG), inclus dans le dossier OpenFAST (aller dans ...OpenFAST\glue-codes\simulink\examples), peuvent être utilisés à cet effet. Chaque exemple dispose d'un modèle Simulink (.mdl) et d'un fichier script (.m).

- **OpenLoop :**

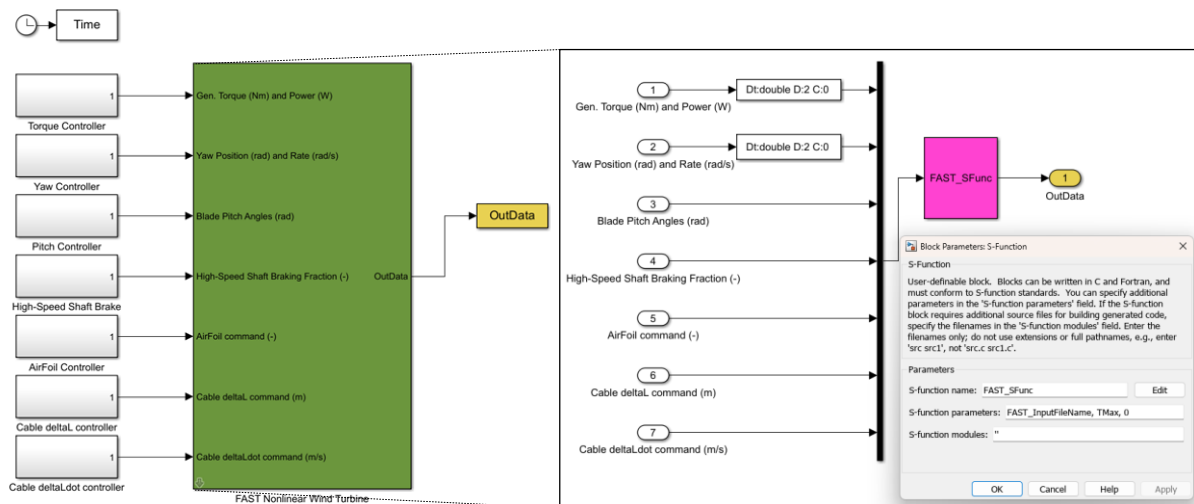
**Ouvrez OpenLoop.mdl:**

- Comme illustré dans la figure 5, le fichier Simulink principal 'FAST Nonlinear Wind Turbine' comporte sept entrées et une sortie, 'OutData'. Voici la fonction S responsable de la communication entre Simulink et OpenFAST. Elle nécessite le nom (FAST\_InputFileName) et le temps de simulation (TMax).

**Ouvrez Run\_OpenLoop.m:**

- Comme illustré dans la figure 6, les paramètres FAST\_InputFileName et TMax doivent être définis dans le fichier script associé (.m).
- FAST\_InputFileName doit avoir le même nom que le fichier principal (.fst) (si ce fichier n'est pas inclus dans le référentiel d'exploitation Matlab actuel, le chemin complet doit être écrit avant le nom, comme illustré dans cet exemple).

- L'exécution de cette simulation permet de vérifier et de comprendre la fonction de co-simulation.



- Figure 5 – Blocs OpenLoop dans Simulink

```

Run_OpenLoop.m
1 % make sure the OpenFAST directory where the FAST_SFunc.mex* file is located
2 % is in the MATLAB path (also make sure any other OpenFAST library files that
3 % are needed are on the MATLAB path)
4 % (relative path names are not recommended in addpath()):
5 % addpath('.../build/bin'); % install location for Windows Visual Studio builds
6 % addpath(genpath('.../install')); % cmake default install location
7
8 % these variables are defined in the OpenLoop model's FAST_SFunc block:
9 FAST_InputFileName = '.../reg_tests/r-test/glue-codes/openfast/AOC_Wst/AOC_Wst.fst';
10 TMax               = 60; % seconds
11
12 sim('OpenLoop.mdl', [0, TMax]);

```

- Figure 6 – Script Matlab OpenLoop

- **Test01\_SIG:**

Dans ce cas, un modèle simplifié d'un générateur à induction simple (SIG) est associé au modèle pour évaluer les performances en présence d'une charge couplée à l'arbre haute vitesse. Le modèle et la chaîne de conversion sont illustrés à la figure 7.

**Ouvrez Test01\_SIG.mdl:**

- La figure 7 illustre le couplage de l'éolienne avec un modèle de générateur à induction. La première entrée est un signal double qui inclut le couple et la puissance du générateur.
- Le couple doit être contrôlé pour atteindre une puissance maximale à faible vitesse du vent.
- De plus, le modèle de machine utilise le signal de sortie généré par OpenFAST (vitesse de rotation de l'arbre à faible vitesse, ou « tr/min ») comme entrée. La valeur est extraite de la matrice OutData à l'aide du bloc Fnc avec l'expression suivante :  $u(\text{strmatch}('LSSGagVxa', \text{OutList}))$ , où LSSGagVxa représente la vitesse du générateur.

**Ouvrez Run\_Test01\_SIG.m:**

- Ce fichier contient les paramètres de la machine IG (.m), en plus des paramètres OpenFAST, FAST\_InputFileName et TMax.

- L'exécution de cette simulation permet de vérifier et de comprendre la simulation en boucle fermée.

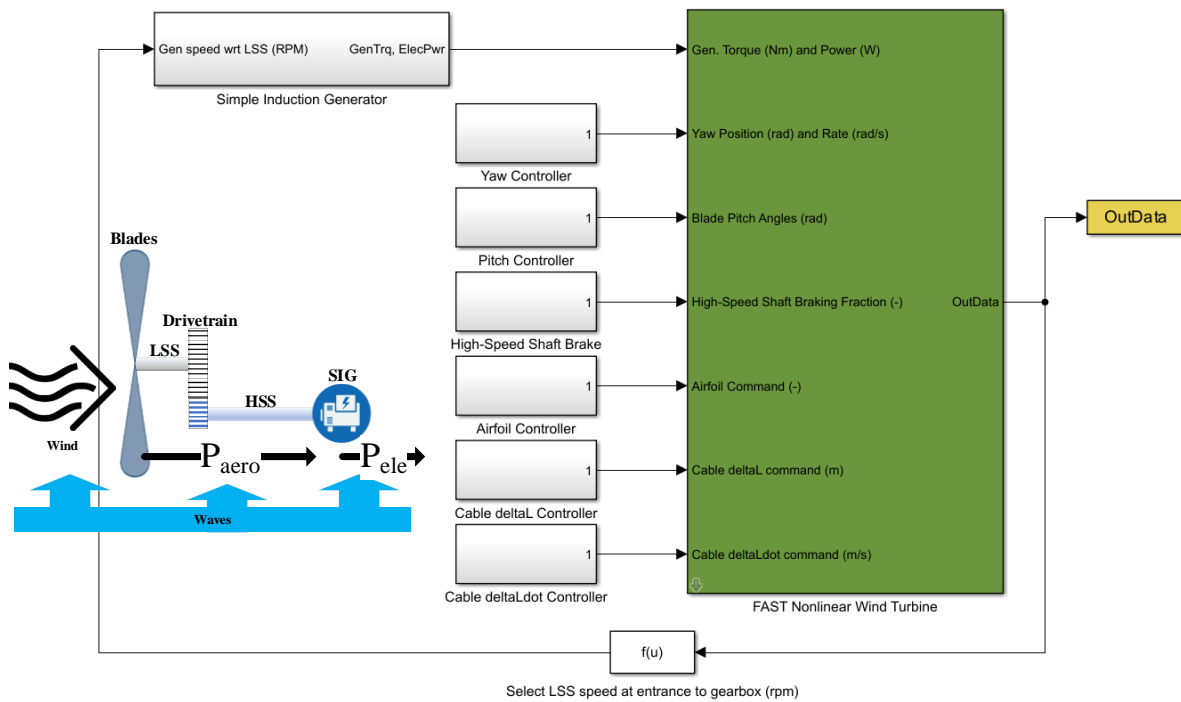


Figure 7 – Test01\_SIG Simulink script

*Remarque : Vous pouvez vérifier la liste des sorties générées. Ouvrez le dossier contenant le fichier principal (.fst) ; après la simulation, des fichiers .sum, .out et .outb sont générés. Il y a un fichier .sum avec le même nom que le fichier principal. Par exemple, dans le cas de Test01\_SIG, le fichier principal s'appelle AWT\_YFix\_WSt.fst, donc le fichier de résumé qui inclut la liste de toutes les sorties s'appelle AWT\_YFix\_WSt.sum, tandis que les résultats de sortie sont fournis dans un fichier avec un nom similaire mais dont l'extension est .out. Voir la figure 8.*

AOC_YFix_WSt.AD	12/04/2023 09:12	Fichier SUM	5 Ko
AOC_YFix_WSt.ED	12/04/2023 09:12	Fichier SUM	8 Ko
AOC_YFix_WSt	<b>Main file (.fst)</b>	12/04/2023 09:12	Fichier FST 8 Ko
AOC_YFix_WSt		12/04/2023 09:12	Document texte 3 Ko
AOC_YFix_WSt	<b>Outputs file (.out)</b>	12/04/2023 09:12	Fichier OUT 131 Ko
AOC_YFix_WSt		12/04/2023 09:12	Fichier OUTB 95 Ko
AOC_YFix_WSt.SrvD		12/04/2023 09:12	Fichier SUM 4 Ko
AOC_YFix_WSt	<b>Summary file (.sum)</b>	12/04/2023 09:12	Fichier SUM 6 Ko
AOC_YFix_WSt.UA		12/04/2023 09:12	Fichier SUM 6 Ko
AOC_YFix_WSt.AD15.ipt		12/04/2023 09:12	Fichier IPT 10 Ko
AOC_YFix_WSt_ElastoDyn		12/04/2023 09:12	Fichier DAT 13 Ko
AOC_YFix_WSt_InflowWind		12/04/2023 09:12	Fichier DAT 6 Ko
AOC_YFix_WSt_ServoDyn		12/04/2023 09:12	Fichier DAT 12 Ko
README.md		12/04/2023 09:12	Fichier MD 1 Ko

Figure 8 – Main and summary files

### 3- Les sorties

Comme mentionné précédemment, chaque module des sous-codes OpenFAST fournit une liste de sorties, en fonction du type et des caractéristiques de l'éolienne. Cependant, il est possible de supprimer ou d'ajouter des sorties supplémentaires qui ne sont pas mentionnées dans la liste des sorties du module.

1. Téléchargez la liste complète des résultats OpenFAST ([lien](#)).
2. Le fichier téléchargé est un fichier Excel avec plusieurs feuilles. Spécifiez le module qui doit générer votre sortie en choisissant la feuille correspondante.
3. En supposant que vous souhaitez ajouter l'accélération avant-arrière de la nacelle à la liste des sorties :
  - a. Sélectionnez la feuille *ElastoDyn*,
  - b. Accédez à la section 'Nacelle IMU Motions',
  - c. La figure 9 illustre la section correspondante et nomme 'l'accélération de translation de l'unité de mesure inertielle de la nacelle le long de l'axe x (NcIMUTAxS)'. Copiez le nom de cette valeur.
  - d. Accédez au fichier *ElastoDyn* associé au modèle sur lequel vous travaillez et collez-le (NcIMUTAxS) dans la liste de sortie à la fin de ce code, comme illustré dans la figure 10.

	A	B	C	D	E	F	
1	Category	Name	Other Name(s)	Description	Convention	Units	Inv
		HSShfta	GenAccel	Angular acceleration of the high-speed shaft and generator	Same sign as LSSGagAxa / LSSGagAxs / LSSGagA	(deg/s^2)	
303							
304	Nacelle IMU Motions						
305		NcIMUTVxs		Nacelle inertial measurement unit translational velocity (absolute)	Directed along the xs-axis	(m/s)	
306		NcIMUTVys		Nacelle inertial measurement unit translational velocity (absolute)	Directed along the ys-axis	(m/s)	
307		NcIMUTVzs		Nacelle inertial measurement unit translational velocity (absolute)	Directed along the zs-axis	(m/s)	
308		NcIMUTAxS		Nacelle inertial measurement unit translational acceleration (absolute)	Directed along the xs-axis	(m/s^2)	
309		NcIMUTAyS		Nacelle inertial measurement unit translational acceleration (absolute)	Directed along the ys-axis	(m/s^2)	
310		NcIMUTAzS		Nacelle inertial measurement unit translational acceleration (absolute)	Directed along the zs-axis	(m/s^2)	
311		NcIMURVxs		Nacelle inertial measurement unit angular (rotational) velocity (absolute)	About the xs-axis	(deg/s)	
312		NcIMURVys		Nacelle inertial measurement unit angular (rotational) velocity (absolute)	About the ys-axis	(deg/s)	
313		NcIMURVzs		Nacelle inertial measurement unit angular (rotational) velocity (absolute)	About the zs-axis	(deg/s)	
314		NcIMURAxS		Nacelle inertial measurement unit angular (rotational) acceleration (absolute)	About the xs-axis	(deg/s^2)	
315		NcIMURAyS		Nacelle inertial measurement unit angular (rotational) acceleration (absolute)	About the ys-axis	(deg/s^2)	
316		NcIMURAzS		Nacelle inertial measurement unit angular (rotational) acceleration (absolute)	About the zs-axis	(deg/s^2)	
317	Rotor-Furl Motions						
318		RotFurlP	RotFurl	Rotor-furl angle (position)	About the rotor-furl axis	(deg)	
319		RotFurlV		Rotor-furl angular velocity	About the rotor-furl axis	(deg/s)	
320		RotFurlA		Rotor-furl angular acceleration	About the rotor-furl axis	(deg/s^2)	
321	Tail-Furl Motions						
322		TailFurlP	TailFurl	Tail-furl angle (position)	About the tail-furl axis	(deg)	
323		TailFurlV		Tail-furl angular velocity	About the tail-furl axis	(deg/s)	
324		TailFurlA		Tail-furl angular acceleration	About the tail-furl axis	(deg/s^2)	
325	Nacelle Yaw Motions						
326		YawPzn	YawPzp, NacYawP, NacYaw, YawPos	Nacelle yaw angle (position)	About the zn- and zp-axes	(deg)	

Figure 9 – Sélection d'une nouvelle sortie dans la liste de sortie.

```

"Baseline_Tower.dat" TwrFile "Name of file containing tower properties (quoted string)
-----
OUTPUT
-----
True SumPrint - Print summary data to "<RootName>.sum" (flag)
True 1 OutFile - Switch to determine where output will be placed: {1: in module output file only; 2: in glue code output file only; 3: both} (currently unused)
True TabDelim - Use tab delimiters in text tabular output file? (flag) (currently unused)
"ES10_3E2" OutFmt - Format used for text tabular output (except time). Resulting field should be 10 characters. (quoted string) (currently unused)
0 TStart - Time to begin tabular output (s) (currently unused)
10 DecFact - Decimation factor for tabular output {1: output every time step} (-) (currently unused)
4, 7 NTwGages - Number of tower nodes that have strain gages for output [0 to 9] (-)
0 TwrGagNd - List of tower nodes that have strain gages [1 to TwrNodes] (-) [unused if NTwGages=0]
0 NB1Gages - Number of blade nodes that have strain gages for output [0 to 9] (-)
0 BldGagNd - List of blade nodes that have strain gages [1 to BldNodes] (-) [unused if NB1Gages=0]
OutList - The next line(s) contains a list of output parameters. See OutListParameters.xlsx for a listing of available output channels, (-)
"RotSpeed" - Rotor speed
"BldPitch1" - Blade 1 pitch angle
"OoPDefl1" - OoP blade 1,3 tip deflections
"OoPDefl3" - OoP blade 1,3 tip deflections
"TipALxb1" - Blade 1 flapwise tip acceleration
"RootMxb1" - Blade 1 root moments
"RootMyb1" - Blade 1 root moments
"RootMzb1" - Blade 1 root moments
"RotThrust" - Rotor thrust and rotating LSS shear forces
"LSShftFya" - Rotor thrust and rotating LSS shear forces
"LSShftFza" - Rotor thrust and rotating LSS shear forces
"LSSTipMya" - Rotating LSS bending moments at the shaft tip
"LSSTipMza" - Rotating LSS bending moments at the shaft tip
"RotTorg" - Rotor (mechanical) torque & power and generator (electrical) power
"RotPwr" - Rotor (mechanical) torque & power and generator (electrical) power
"TTDspFA" - FA and SS tower-top deflections
"TTDspSS" - FA and SS tower-top deflections
"TwHt1MLxt" - Tower, Gage-1 (Node 4) roll, pitch, and yaw moments
"TwHt1MLyt" - Tower, Gage-1 (Node 4) roll, pitch, and yaw moments
"TwHt1MLzt" - Tower, Gage-1 (Node 4) roll, pitch, and yaw moments
"TwHt" - local tower forces
"TwHt" - local tower forces
"TwHt" - local tower forces
"NcIMUTAxS"
END of input file (the word "END" must appear in the first 3 columns of this last OutList line)

```

Figure 10 – Ajout d'une nouvelle sortie à la liste de sortie.

**Remarque :** Certaines sorties ont plus d'un nom.

**Remarque :** La nouvelle version d'OpenFAST a supprimé certains noms de sortie. Si vous ne parvenez pas à trouver le nom de sortie, il est recommandé de vérifier la version.

# Modélisation FOWT – Notions de base

## 1- Modélisation d'éoliennes

### 1-1- Modèle aérodynamique:

Les pales de la turbine capturent la puissance aérodynamique (cinétique du vent) et la convertissent en puissance mécanique en faisant tourner l'arbre à basse vitesse (LSS). La puissance aérodynamique capturée ( $P_{aero}$ ) peut être exprimée comme suit [2]:

$$P_{aero} = \frac{Cp(\beta, \lambda)}{2} \rho \pi R^2 V^3 = \frac{Cp(\beta, \lambda)}{2} \rho S V^3 \quad (1)$$

où  $V$  est la vitesse du vent,  $Cp$  est le coefficient de puissance,  $\beta$  est l'angle d'inclinaison,  $\lambda$  est le rapport de vitesse de l'extrémité (tip speed ratio 'TSR'),  $R$  est le rayon,  $S$  est la surface balayée par les pales, et  $\rho$  ( $=1,225$ ) est la densité de l'air. Le couple aérodynamique ( $T_{aero}$ ) peut être exprimé comme

$$T_{aero} = \frac{P_{aero}}{\omega_{LSS}} = \frac{Cp(\beta, \lambda)}{2\lambda} \rho \pi R^3 V^2 \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{R\omega_{LSS}}{V} \quad (3)$$

où  $\omega_{LSS}$  est la vitesse de rotation de l'arbre à basse vitesse (LSS), la fonction  $Cp$  est non linéaire et a plusieurs formes [2]. La plus courante est :

$$Cp(\beta, \lambda) = c_1 \left( \frac{c_2}{\xi} - c_3\beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\xi}} + c_6\lambda \quad (4)$$

$$\frac{1}{\xi} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

où  $c_1=0.5176$ ,  $c_2=116$ ,  $c_3=0.4$ ,  $c_4=5$ ,  $c_5=21$ ,  $c_6=0.0068$ . La figure 11 présente les courbes de  $Cp$  en fonction du TSR ( $\lambda$ ).

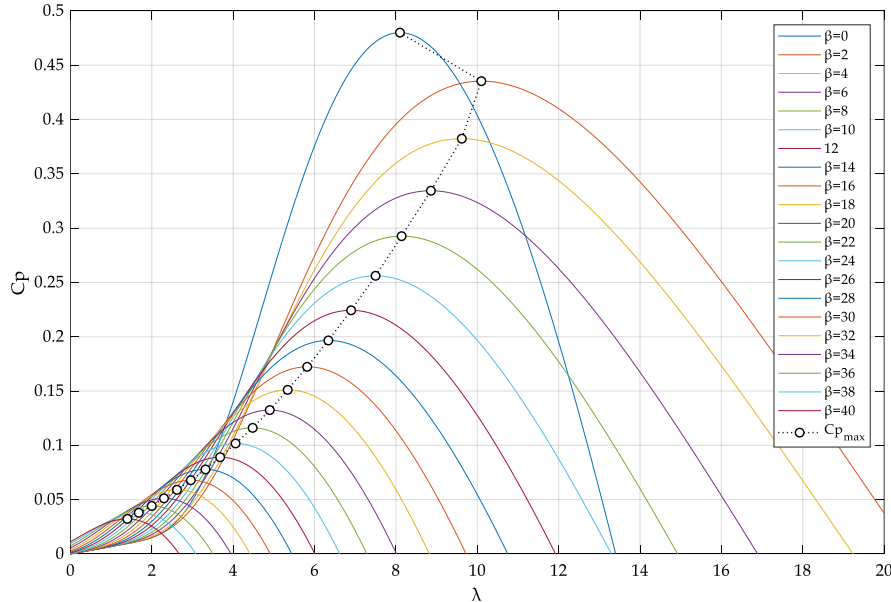


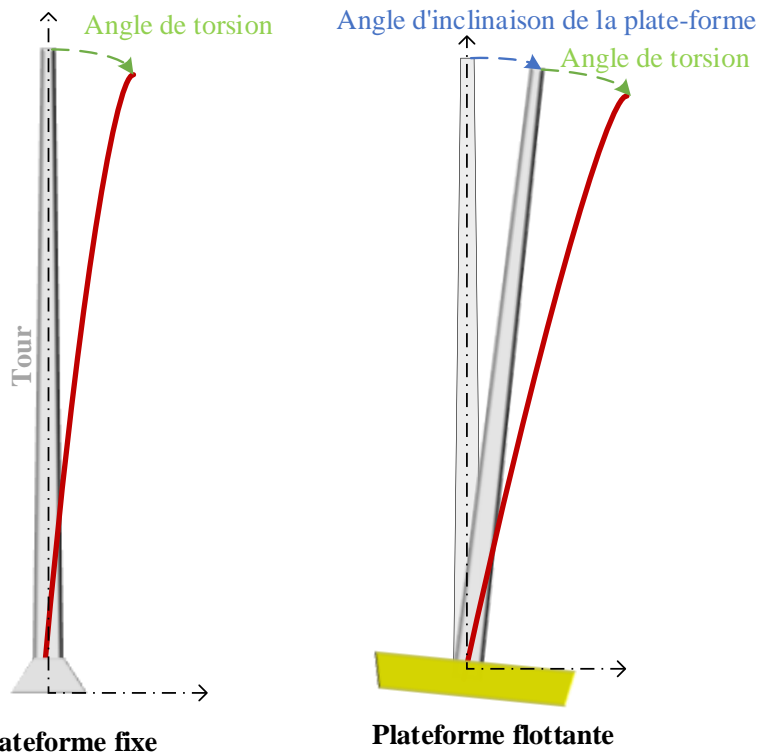
Figure 11 – Courbes de  $C_p$  en fonction du TSR ( $\lambda$ )

Définition des paramètres dans FAST :

Paramètres	En OpenFAST	Emplacement
$R$	TipRad	ELASTODYN - TURBINE CONFIGURATION
$\rho$	AirDens	Main file (.fst) - ENVIRONMENTAL CONDITIONS

Cependant, la puissance réelle récoltée est inférieure à la puissance théorique en raison de plusieurs facteurs structurels et environnementaux. D'après la figure 11, le FOWT est installé sur une plateforme flottante qui peut avoir des mouvements supplémentaires. De plus, il a une longueur de tour significative, ce qui peut augmenter son angle de torsion et sa déflexion. Ces facteurs peuvent induire des mouvements significatifs de la nacelle qui peuvent modifier la vitesse de rotation du moyeu. Par conséquent, les mouvements avant-arrière de la nacelle doivent être inclus dans l'Équation (1), en plus de la vitesse du vent. OpenFAST fournit ces mouvements dans la liste de sortie, section mouvements de l'unité de mesure inertielle de la nacelle (nacelle inertial measurement unit: NcIMU) dans le fichier ElastoDyn, tels que :

- NcIMURVxs : vitesse de rotation selon l'axe des x (avant-arrière) en deg/s.
- NcIMUTVxs : vitesse de translation avant-arrière en m/s.
- NcIMUTAxS : accélération translationnelle avant-arrière en  $m^2/s$ .



- Figure 12 – Déplacement avant-arrière de la nacelle en fonction des déflexions de la tour : plateforme fixe vs plateforme flottante

De plus, un facteur essentiel est la flexibilité des pales. La figure 12 montre comment de grandes déflexions des pales peuvent réduire de manière significative la surface balayée ( $S$ ) par rapport à celle des pales rigides ( $S_0$ ). OpenFAST inclut des modèles aérodynamiques de haute-fidélité, tels que BEM, BEM dynamique (DBEM) et OLAF, pour accommoder cette flexibilité. Pour changer ce modèle dans OpenFAST, modifiez le drapeau 'WakeMod' dans AeroDynV15 (0=aucun, 1=BEM, 2=DBEM, 3=OLAF).

Remarque : WakeMod ne peut pas être égal à 2 ou 3 lors de la linéarisation.

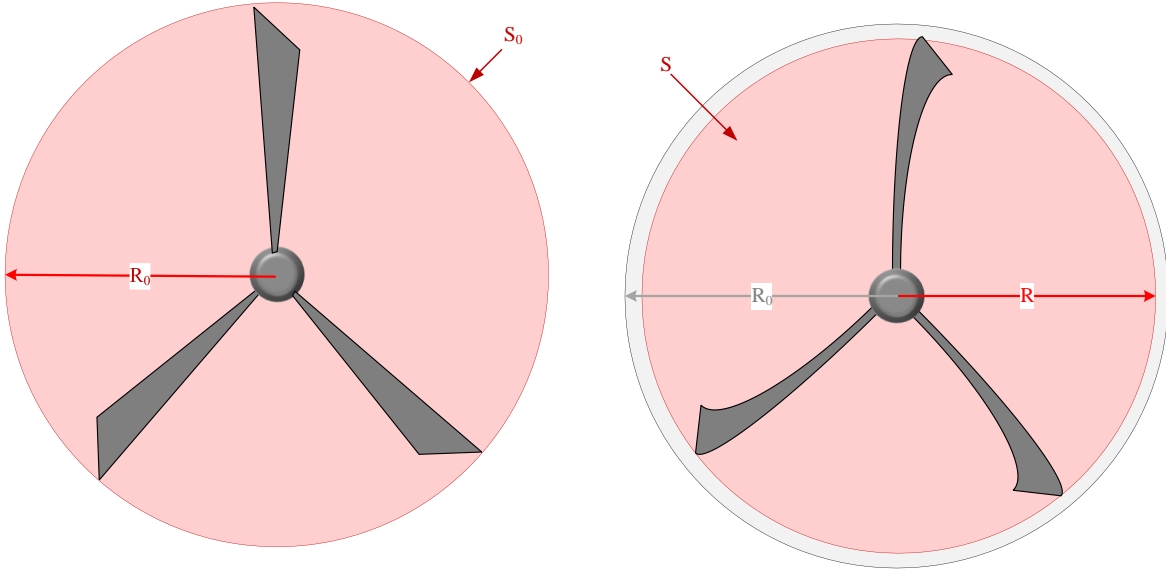


Figure 13 – Surface balayée ( $S_0$ ) considérant des pales rigides et surface balayée ( $S$ ) considérant des pales flexibles

### 1-2- Modèle mécanique (boîte de vitesse de transmission) :

Le modèle mécanique de la chaîne cinématique à deux masses de l'éolienne est modélisé en fonction de la masse de la boîte de vitesses et de la masse de la roue éolienne [3], comme expliqué dans la figure 14.

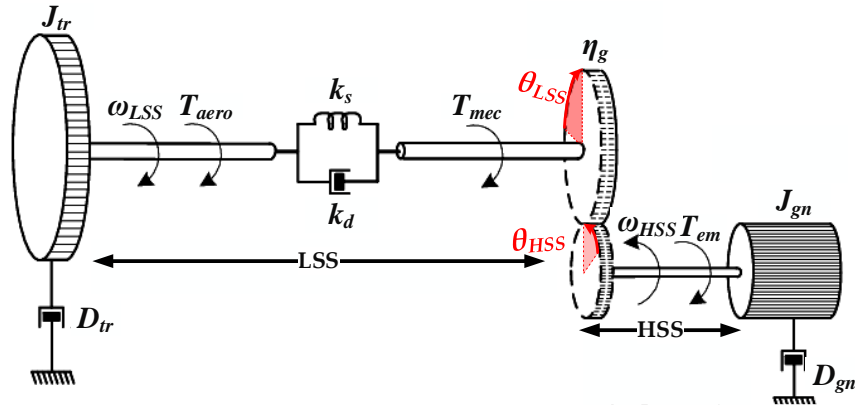


Figure 14 – système de boîte de vitesses à deux masses

Les équations mathématiques d'un modèle de transmission à deux masses sont données sur la base de la deuxième loi de Newton. La dynamique de l'arbre à faible vitesse peut être exprimée comme:

$$J_{tr} \frac{d\omega_{LSS}}{dt} = T_{aero} - T_{mec} - \omega_{LSS} D_{tr} \quad (5)$$

Où  $T_{aero}$  est le couple aérodynamique,  $J_{tr}$  est l'inertie de l'arbre de la turbine,  $D_{tr}$  est le coefficient d'amortissement de la turbine, et  $T_{mec}$  est le couple mécanique, qui peut être calculé comme suit :



$$T_{mec} = k_s \underbrace{(\theta_{LSS} - \theta_{HSS})}_{\theta_r} + k_d \underbrace{(\omega_{LSS} - \omega_{HSS})}_{\dot{\theta}_r} = k_s \theta_r + k_d \dot{\theta}_r \quad (6)$$

Où  $k_s$  est la rigidité de la chaîne,  $k_d$  est le facteur d'amortissement, et  $\theta_r$  est l'angle entre le rotor de la turbine et le rotor du générateur (torsion angle of the mass).

D'autre part, la dynamique HSS peut être exprimée comme suit :

$$J_{gn} \frac{d\omega_{HSS}}{dt} = \frac{T_{mec}}{\eta_g} - T_{em} - \omega_{HSS} D_{gn} \quad (7)$$

Où  $T_{em}$  est le couple électromagnétique,  $\omega_{HSS}$  est la vitesse de la génératrice (HSS),  $J_{gr}$  est l'inertie de l'arbre du côté générateur,  $D_{gn}$  est le coefficient d'amortissement du générateur, et  $\eta_g$  est le rapport de transmission. En utilisant la transformation de Laplace

$$\omega_{LSS} = (T_{aero} - T_{mec}) \frac{1}{sJ_{tr} + D_{tr}} \quad (8)$$

En négligeant tous les facteurs d'amortissement et de rigidité, Équation (7) peut être réécrite comme

$$\begin{aligned} J_{gn} \frac{d\omega_{HSS}}{dt} &= \frac{1}{\eta_g} \left( T_{aero} - J_{tr} \frac{d\omega_{LSS}}{dt} \right) - T_{em} \\ &= \frac{1}{\eta_g} \left( T_{aero} - J_{tr} \frac{1}{\eta_g} \frac{d\omega_{HSS}}{dt} \right) - T_{em} \\ &= \frac{T_{aero}}{\eta_g} - \frac{J_{tr}}{\eta_g^2} \frac{d\omega_{HSS}}{dt} - T_{em} \end{aligned} \quad (9)$$

Après simplifications

$$\left( J_{gr} + \frac{J_{tr}}{\eta_g^2} \right) \frac{d\omega_{HSS}}{dt} = \frac{T_{aero}}{\eta_g} - T_{em} \quad (10)$$

Pour l'arbre à basse vitesse, Équation (10) peut être fournie comme suit :

$$\left( J_{gr} + \frac{J_{tr}}{\eta_g^2} \right) \eta_g \frac{d\omega_{LSS}}{dt} = \frac{T_{aero}}{\eta_g} - T_{em} \quad (11)$$

$$\underbrace{\left( \eta_g^2 J_{gr} + J_{tr} \right)}_{J_{mec}} \frac{d\omega_{LSS}}{dt} = T_{aero} - \eta_g T_{em} \quad (12)$$

Définition des paramètres dans FAST :

Paramètres	En OpenFAST	Emplacement
$J_{tr}$	HubIner	ELASTODYN- MASS AND INERTIA
$J_{gr}$	GenIner	ELASTODYN- MASS AND INERTIA
$\eta_g$	GBRatio	ELASTODYN- DRIVETRAIN
$k_s$	DTTorSpr	ELASTODYN- DRIVETRAIN
$k_d$	DTTorDmp	ELASTODYN- DRIVETRAIN

### 1-3- Linéarisation du modèle :

Le couple aérodynamique linéarisé aux points de linéarisation (lp) est fourni comme suit :

$$\Delta T_{aero} = \left. \frac{\partial T_{aero}}{\partial \omega_{HSS}} \right|_{\omega_{g,lp}} \Delta \omega_{HSS} + \left. \frac{\partial T_{aero}}{\partial \beta} \right|_{\beta_{lp}} \Delta \beta + \left. \frac{\partial T_{aero}}{\partial V} \right|_{V_{lp}} \Delta V \quad (13)$$

Le modèle linéaire de la vitesse du générateur basé sur l'Équation (13) est :

$$\Delta \dot{\omega}_{HSS} = \frac{\eta_g}{J_{mec}} (\Delta T_{aero} - \eta_g \Delta T_{em}) \quad (14)$$

$$\Delta \dot{\omega}_{HSS} = A_{\omega_{HSS}} \Delta \omega_{HSS} + B_{\beta} \Delta \beta + B_V \Delta V + B_{T_{em}} \Delta T_{em} \quad (15)$$

$$\Delta \omega_{HSS} (s + A_{\omega_{HSS}}) = B_{\beta} \Delta \beta + B_V \Delta V + B_{T_{em}} \Delta T_{em} \quad (16)$$

## 2- Conception de contrôle

### 2-1- Objectifs du contrôle

La figure 15 montre les zones de fonctionnement d'une éolienne flottante.

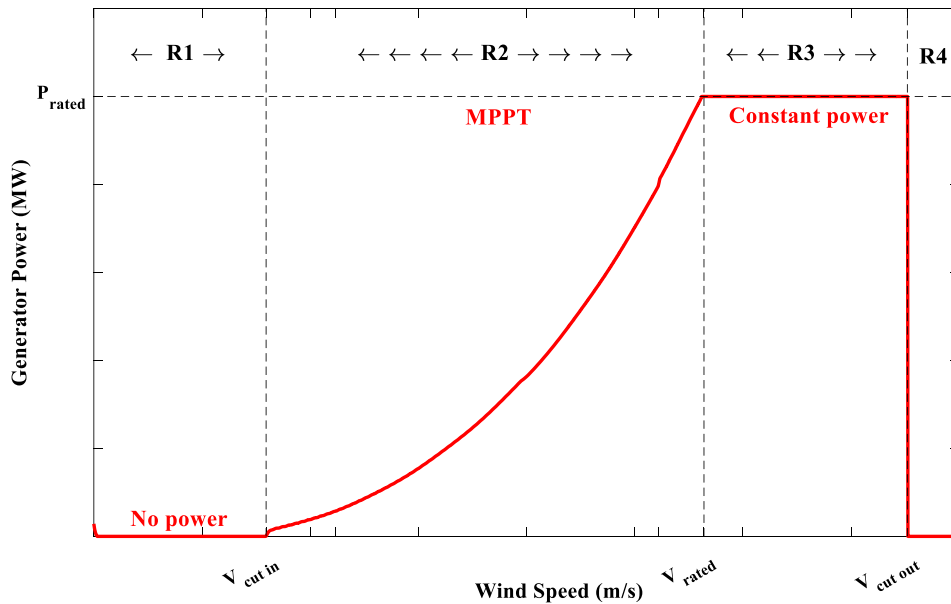


Figure 15 – L'énergie éolienne en fonction de la vitesse du vent

Comme illustré dans la Figure 15, les principaux objectifs du contrôle de l'éolienne sont de maximiser la production d'énergie lorsque la vitesse du vent est supérieure à la valeur de coupure (en R2) et de la maintenir à la valeur nominale lorsque la vitesse du vent est supérieure à la valeur nominale. (en R3). Cela peut être réalisé en contrôlant la fonction  $C_p$ . Le système de contrôle doit le maximiser en R2 et le réduire pour diminuer le couple aérodynamique en R3 en ajustant l'angle de pas et le couple du générateur. Si la vitesse du vent ne dépassait pas la valeur de coupure mais était inférieure à la valeur nominale (en R1), les pales du vent tournaient à une très faible vitesse,

ne produisant aucune énergie. Par conséquent, l'éolienne est arrêtée. Si la vitesse du vent dépasse la valeur de coupure, le contrôle doit arrêter la vitesse de rotation à ce niveau (en R4).

### Hypothèses:

- Dans la région 3, le couple du générateur est constant, donc  $\Delta T_{em} = 0$ .
- Dans la région 2, les angles d'inclinaison des pales sont supposés constants, donc  $\Delta\beta = 0$ .
- Lors de la linéarisation à vitesse du vent constante, la perturbation  $\Delta V$  est nulle et  $B_V$  est fixée à 0. Par conséquent, les paramètres de l'Equation (16) sont calculés à vitesse du vent constante ( $V_{lp}$ ) comme suit :

$$A_{\omega_{HSS}}(V_{lp}) = \frac{\eta_g}{J_{mec}} \frac{\partial T_{aero}}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial \omega_{HSS}} \quad (17)$$

$$\frac{\partial T_{aero}}{\partial \lambda} = \frac{1}{2\lambda_{lp}^2} \rho SR V_{lp}^2 \left( \frac{\partial Cp}{\partial \lambda} \Big|_{\lambda_{lp}} \Delta\lambda - Cp(\lambda_{lp}) \right) \quad (18)$$

$$\frac{\partial \lambda}{\partial \omega_{HSS}} = \frac{R}{V_{lp}} \quad (19)$$

$$B_{\beta}(V_{lp}) = \frac{\eta_g}{J_{mec}} \frac{\partial T_{aero}}{\partial \beta} \quad (20)$$

$$B_{Tem}(V_{lp}) = -\frac{\eta_g}{J_{mec}} \eta_g \quad (21)$$

D'après [4], le coefficient de puissance  $Cp$  peut être calculé à n'importe quel point de fonctionnement comme suit :

$$Cp(\lambda_{lp}) = Cp_{rated} \left( \frac{\lambda_{lp}}{\lambda_{rated}} \right)^3 \quad (22)$$

### 2-3- Contrôleur de région II (MPPT) :

L'objectif de contrôle dans cette région est de maximiser la puissance générée en contrôlant le couple du générateur. Il existe de nombreuses stratégies dans la littérature, telles que le contrôle de couple optimal (OTC), le contrôle du TSR (TSRC), la logique floue et l'apprentissage par renforcement.

#### 2-3-1- OTC:

Basé sur les courbes  $Cp$  de l'Équation (4) et la Figure 4, l'éolienne peut atteindre son MPP en utilisant une stratégie MPPT, telle que la stratégie de contrôle de couple optimal (OTC) [5]. La valeur maximale de  $Cp$  ( $Cp_{max}$ ) et la valeur correspondante de lambda ( $\lambda_{opt}$ ) peuvent être détectées.  $\lambda_{opt}$  et  $Cp_{max}$  sont obtenus à partir des courbes  $Cp$ . En utilisant l'Equation (2), la vitesse du vent correspondant à la puissance maximale peut être estimée comme suit:

$$V_{est} = \frac{R\omega_{LSS}}{\lambda_{opt}} \quad (23)$$

Par conséquent, le couple optimal qui maximise la puissance peut être calculé en se basant sur l'Équation (2-3) comme suit :

$$T_{aero}^{opt} = \frac{Cp_{max}}{2\lambda_{opt}} \rho \pi R^3 V^2 \quad (24)$$

La valeur optimale du couple du générateur peut être calculée comme suit :

$$\begin{aligned} T_{em}^{opt} &= \frac{T_{aero}^{opt}}{\eta_g} = \frac{Cp_{max}}{2\eta_g \lambda_{opt}^3} \rho \pi R^5 \omega_{LSS}^2 \\ &= k_{mopt} \omega_{LSS}^2 \end{aligned} \quad (25)$$

### 2-3-2- Contrôleur PI de suivi TSR :

Les erreurs de modélisation peuvent affecter de manière significative la fiabilité de la méthode OTC traditionnelle, car la flexibilité des rotors modernes varie en fonction des vitesses du vent. Par conséquent, le contrôleur de suivi du TSR a été adopté. Ce contrôleur peut maintenir le TSR à sa valeur optimale en fonction de la vitesse du vent (valeur mesurée ou estimée). Un contrôleur PI est utilisé pour minimiser l'erreur entre les valeurs de vitesse du générateur mesurées et de référence, où la vitesse de référence est calculée comme suit :

$$\omega_{ref} = \eta_g \frac{\lambda_{opt} V}{R} \leq \omega_{rated} \quad (26)$$

La boucle fermée de l'Équation (16) avec un contrôleur PI dans la région de fonctionnement inférieure à la valeur nominale peut être présentée comme suit :

$$H_{Tem}(s) = \frac{B_{Tem} (k_{pTSR}s + k_{iTSR})}{s^2 + s(B_{Tem}k_{pTSR} - A_{\omega_{HSS}}) + B_{Tem}k_{iTSR}} \quad (27)$$

Les paramètres du contrôleur PI peuvent être calculés comme suit :

$$k_{pTSR} = \frac{1}{B_{Tem}} (2\zeta_{TSR} \omega_{nTSR} + A_{\omega_{HSS}}) = -\frac{J_{mec}}{\eta_g^2} (2\zeta_{TSR} \omega_{nTSR} + A_{\omega_{HSS}}) \quad (28)$$

$$k_{iTSR} = \frac{\omega_{nTSR}^2}{B_{Tem}} = -\frac{J_{mec}}{\eta_g^2} \omega_{nTSR}^2 \quad (29)$$

Où  $\omega_{nTSR}$  représente le contrôleur de fréquence naturelle (= 0,15 rad/s pour 5 MW NREL FOWT) et  $\zeta_{TSR}$  représente son facteur d'amortissement (= 0,7 pour 5 MW FOWT). Souvent, ils sont réglés pour  $V=V_{rated}$ .

## 2-4- Contrôleur de la région III

### 2-4-1- Contrôleur de couple

Il est possible de contrôler le couple dans cette région par l'une des deux méthodes suivantes : contrôle à couple constant, Équation (30), ou contrôle à puissance constante, Équation (31) :

$$T_{em} = \frac{P_{rated}}{\omega_{rated}} \quad (30)$$

$$T_{em}(t) = \frac{P_{rated}}{\omega_{HSS}(t)} \quad (31)$$

Dans le contrôle de couple constant, les variations de la puissance de sortie sont directement liées aux variations de la vitesse du générateur. Si un contrôle de puissance constante est utilisé, il y a encore quelques variations dans la puissance de sortie car le retour de vitesse du générateur est filtré en passe-bas, mais la puissance est plus constante. Jonkman [6] affirme que l'utilisation d'un contrôleur de couple de générateur constant peut améliorer la stabilité des plateformes flottantes.

#### 2-4-2- Contrôleur d'angle de tangage (contrôleur de base GSPI) :

Dans cette région, la vitesse et la puissance du générateur sont régulées autour de leurs valeurs nominales, donc l'équation (14) peut être réécrite comme suit :

$$\frac{d}{dt}(\omega_{rated} + \Delta\omega_{HSS}) = \frac{\eta_g}{J_{mec}}(T_{aero} - \eta_g T_{em}) \quad (32)$$

Où les couples aérodynamiques et générateurs sont simplifiés en utilisant le développement en série de Taylor du premier ordre comme suit :

$$T_{aero} = \eta_g \frac{P_{aero}}{\omega_{HSS}} = \eta_g \left( \frac{P_{aero}}{\omega_{rated}} + \frac{1}{\omega_{rated}} \left( \frac{\partial P_{aero}}{\partial \beta} \right) \Delta\beta \right) \quad (33)$$

$$T_{em} = \frac{P_{nom}}{\omega_{HSS}} = \frac{P_{nom}}{\omega_{rated}} - \frac{P_{nom}}{\eta_g \omega_{rated}^2} \Delta\omega_{HSS} \quad (34)$$

En remplaçant ces équations dans l'Équation (32) :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta\omega_{HSS} &= \frac{\eta_g}{J_{mec}} \left( \eta_g \left( \frac{P_{aero}}{\omega_{rated}} + \frac{1}{\omega_{rated}} \left( \frac{\partial P_{aero}}{\partial \beta} \right) \Delta\beta \right) - \eta_g \left( \frac{P_{nom}}{\omega_{rated}} - \frac{P_{nom}}{\eta_g \omega_{rated}^2} \Delta\omega_{HSS} \right) \right) \\ &= \frac{\eta_g^2}{J_{mec} \omega_{rated}} \left( \left( \frac{\partial P_{aero}}{\partial \beta} \right) \Delta\beta + \frac{P_{nom}}{\eta_g \omega_{rated}} \Delta\omega_{HSS} \right) \end{aligned} \quad (35)$$

D'autre part,  $\Delta\beta$  est généré par un régulateur PI. Par conséquent, l'Équation (35) peut être réécrite comme suit :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta\omega_{HSS} &= \frac{\eta_g^2}{J_{mec} \omega_{rated}} \left( \frac{\partial P_{aero}}{\partial \beta} \left( k_{pGSPI} \Delta\omega_{HSS} + k_{iGSPI} \int \Delta\omega_{HSS} dt \right) + \frac{P_{nom}}{\eta_g \omega_{rated}} \Delta\omega_{HSS} \right) \\ &= \frac{\eta_g^2}{J_{mec} \omega_{rated}} \left( k_{pGSPI} \frac{\partial P_{aero}}{\partial \beta} \Delta\omega_{HSS} + k_{iGSPI} \frac{\partial P_{aero}}{\partial \beta} \int \Delta\omega_{HSS} dt + \frac{P_{nom}}{\eta_g \omega_{rated}} \Delta\omega_{HSS} \right) \end{aligned} \quad (36)$$

Based on the recommendation in [7], using Laplace transformation and by setting  $de/dt = \Delta\omega_{LSS}$

Sur la base de la recommandation de [7], en utilisant la transformation de Laplace et en définissant  $de/dt = \Delta\omega_{LSS}$  :

$$e \left( s^2 + \frac{k_{pGSPi} \eta_g^2 \left( -\frac{\partial P_{aero}}{\partial \beta} \right)}{J_{mec} \omega_{rated}} s + \frac{k_{iGSPi} \eta_g^2 \left( -\frac{\partial P_{aero}}{\partial \beta} \right)}{J_{mec} \omega_{rated}} \right) = e \left( s^2 + \frac{\zeta_{GSPi}}{\omega_{nGSPi}} s + \frac{1}{\omega_{nGSPi}^2} \right) = 0 \quad (37)$$

Par conséquent, les gains de contrôle sont calculés comme suit :

$$k_{pGSPi} = 2\zeta_{GSPi} \omega_{nGSPi} \frac{J_{mec} \omega_{rated}}{\eta_g^2 \left( -\frac{\partial P_{aero}}{\partial \beta} \right)} = 2\zeta_{GSPi} \omega_{nGSPi} \frac{J_{mec}}{\eta_g \left( -\frac{\partial T_{aero}}{\partial \beta} \right)} = \frac{-2\zeta_{GSPi} \omega_{nGSPi}}{B_\beta} \quad (38)$$

$$k_{iGSPi} = \omega_n^2 \frac{J_{mec} \omega_{rated}}{\eta_g^2 \left( -\frac{\partial P_{aero}}{\partial \beta} \right)} = \omega_n^2 \frac{J_{mec}}{\eta_g \left( -\frac{\partial T_{aero}}{\partial \beta} \right)} = -\frac{\omega_{nGSPi}^2}{B_\beta} \quad (39)$$

Selon [8], les gains PI changent linéairement avec la variation de l'angle de pas. Par conséquent, la loi de commande, y compris le facteur de correction de la planification du gain, peut être présentée comme suit :

$$\Delta\beta = \alpha(\beta) \left( k_{pGSPi} e(t) + k_{iGSPi} \int e(t) dt \right) \quad (40)$$

$$\alpha(\beta) = \frac{1}{1 + \beta / \beta_k} \quad (41)$$

Où  $\beta_k$  symbolise l'angle des pales auquel la valeur de sensibilité de l'angle de des pales double par rapport à celle du point de fonctionnement nominal.

---

## Références

- [1] J. M. Jonkman and M. L. Buhl, "FAST Users Guide NREL," Golden, CO (United States), 2005.
- [2] I. Guenoune, F. Plestan, A. Chermitti, and C. Evangelista, "Modeling and robust control of a twin wind turbines structure," *Control Eng. Pract.*, vol. 69, pp. 23–35, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.conengprac.2017.08.009.
- [3] S. Hu and B. Song, "Optimal Control Strategies of Wind Turbines for Load Reduction," in *Modeling and Modern Control of Wind Power*, 2017, pp. 63–83. doi: 10.1002/9781119236382.ch4.
- [4] C. L. Bottasso and A. Croce, "Power curve tracking with tip speed constraint using LQR regulators," *Sci. Rep. DIA-SR*, no. December, pp. 1–19, 2009, [Online]. Available: [http://www.aero.polimi.it/bottasso/downloads/CLBottasso\\_ACroce\\_2009c.pdf](http://www.aero.polimi.it/bottasso/downloads/CLBottasso_ACroce_2009c.pdf)
- [5] M. Yin, W. Li, C. Y. Chung, L. Zhou, Z. Chen, and Y. Zou, "Optimal torque control based on effective tracking range for maximum power point tracking of wind turbines under varying wind conditions," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 11, no. 4, pp. 501–510, Mar. 2017, doi: 10.1049/iet-rpg.2016.0635.
- [6] J. Jonkman, "Definition of the Floating System for Phase IV of OC3," *Contract*, vol. 1, no. May, p. 31, 2010, [Online]. Available: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Definition+of+the+Floating+System+for+Phase+IV+of+OC3#0>
- [7] M. H. Hansen, A. Hansen, T. J. Larsen, S. Øye, P. Sørensen, and P. Fuglsang, *Control design for a pitch-regulated, variable speed wind turbine*, vol. 1500, no. January. Roskilde, Denmark, 2005. [Online]. Available: [https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/7710881/ris\\_r\\_1500.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/7710881/ris_r_1500.pdf)
- [8] J. M. Jonkman, "Dynamics modeling and loads analysis of an offshore floating wind turbine," *Natl. Renew. Energy Lab. NREL/TP-500-41958*, vol. 68, no. November, p. 233, Dec. 2007, doi: 10.2172/921803.