



UNIVERSITE SULTAN MOULAY SLIMANE

Faculté des Sciences et Techniques

Béni-Mellal



Centre d'Études Doctorales : Sciences et Techniques
Formation Doctorale : Mathématiques et Physiques Appliquées

THÈSE

Présentée par

ZAKARIA KHAOUCH

Pour l'obtention du grade de

DOCTEUR

Spécialité : Génie Industriel et Energie Renouvelable

Option : Génie Mécanique et Mécatronique

Approche mécatronique pour la modélisation et le contrôle d'une turbine éolienne en vue de la maîtrise de leur comportement dynamique

Soutenue le 25/03/2017 à 9h devant la commission d'examen composée de :

Président	: Pr. Said MELLIANI	PES	FST - Béni Mellal
Rapporteurs	: Pr. Said MELLIANI	PH	FST - Béni Mellal
	Pr. Mustapha AIT LAFKIH	PH	FST - Béni Mellal
Examineurs	: Pr. Abdelouahed ABOUNADA	PH	FST - Béni Mellal
	Pr. Jamaa BENGOURAM	PH	FST - Béni Mellal
	Pr. Mohamed DIANY		
Directeurs de thèse	: Pr. Nourreddine KOUIDER	PH	FST - Béni Mellal
Co-Directeurs de thèse	: Pr. Mustapha MABROUKI	PES	FST - Béni Mellal



Remerciements

Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements à Messieurs les Professeurs Nourreddine KOUIDER, mon directeur de recherche et Mustapha MABROUKI, mon co-directeur de recherche, pour leurs soutiens, leur disponibilité et pour avoir rendu possible l'accomplissement de ma thèse.

Je voudrais remercier également d'une part mes rapporteurs, Messieurs les Professeurs Said MELLIANI et Mustapha AIT LAFKIH pour le temps consacré à l'étude de ce mémoire et d'autre part Monsieur le Professeur Said MELLIANI qui m'a fait l'honneur de présider ce jury. Je remercie également Messieurs les Professeurs Jamaa BENGOURAM et Mohamed DIANY pour avoir participé à ce jury de thèse. Tous les commentaires et les remarques du jury ont contribué à améliorer beaucoup ce mémoire de thèse, je tiens aussi à exprimer mon profond remerciement à Monsieur le Professeur Mustapha ZEKRAOUI pour son soutien dans la phase de rédaction des articles et de cette thèse.

Merci également aux doctorants de la FST de Beni Mellal et particulièrement les doctorants du laboratoire Génie Industriel de m'avoir fait profiter de leur expérience, pour leurs conseils, leurs encouragements et les bons moments passés ensemble. Parmi ces étudiants, je tiens particulièrement à remercier Kaoutar BAHOU, Naoual AL ARMOUZI, Youssef NAJIH, Mustapha ADAR et Issameddine ZIDANE.

Pour terminer, je remercie du fond du cœur ma famille qui m'a encouragé à entreprendre cette thèse et m'a énormément appris avec ses conseils pendant ces trois ans.



Résumé

Les turbines éoliennes sont des systèmes de production d'énergie électrique à partir de l'énergie cinétique du vent. Les comportements dynamiques de ces systèmes sont difficiles à maîtriser. Ceux-ci sont liés fondamentalement à des interconnexions mal maîtrisées entre les sous-systèmes. Une réflexion sur les différents modèles de la turbine éolienne existants dans la littérature met en évidence un manque des détails de modélisation ainsi que l'absence de prise en compte des interactions énergétiques entre les sous-systèmes. Ces lacunes rendent difficiles l'analyse et la maîtrise des comportements dynamiques de ce système. Dans cette thèse, une approche mécatronique de représentation multiphysique et multiniveaux appliqués aux systèmes de production éolienne a été proposée: la turbine éolienne est considérée comme un système mécatronique multidisciplinaire comprenant différents domaines de la physique comme l'aérodynamique, la mécanique, l'électromécanique, l'électronique de puissance et le système de commande. Ces sous-systèmes sont modélisés en détail et les interactions entre eux sont bien prises en compte. Cette démarche offre une vision énergétique, globale et structurelle pour la maîtrise de la dynamique de ce système complexe. Une réflexion sur les outils de modélisation des systèmes mécatroniques existants a conduit au choix du Bond Graph en tant qu'outil fondamental pour la modélisation des différents éléments du système, l'analyse des propriétés des modèles et la conception des lois de commande. La fiabilité du modèle proposé et la robustesse des lois de commande ont été vérifiées par des simulations.

Mots clés : Mécatronique, Turbine éolienne, Bond Graph, Causalité, Modèle inverse, Bicausalité, Commande.



Abstract

Wind turbines are electric power generation systems that involve dynamic behaviors that are difficult to control. These behaviors are mainly related to poorly controlled couplings between certain subsystems. A state of the art on the existing modeling practices highlights a lack of consideration of energetic interactions between the subsystems, making it difficult to analyze and control these phenomena and leading to point solutions. This work provides an introduction to a mechatronic approach to multiphysical and multilevel representation applied to wind power systems, that is to say, considering the wind system as a multi-domain mechatronics system including various areas of physics such as aerodynamics, mechanics, electromechanics, power electronics and electrical sub-systems. This approach offers an energetic, global and structural vision to master the dynamics of this complex system. A reflection on the existing tools of representation led to the choice of the Bond Graph as a fundamental tool for: modeling the different elements, the analysis of the models properties and the design of inverse model control laws using the bicausality. The reliability of the proposed model and the robustness of the control were validated by simulations.

Keywords: Mechatronics, Wind Turbine, Bond Graph, Causality, Inverse Model, Bicausality, Control.



Table des matières

Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Table des matières	vii
Listes des figures	xi
Listes des tableaux	xii
Principales Notations	xiii
Introduction générale	1
1 Contexte et objectifs de thèse	3
1.1 Introduction	3
1.2 Généralités sur la mécatronique	3
1.2.1 Architecture générale d'un système mécatronique	5
1.2.2 Définitions des systèmes mécatroniques complexes	5
1.3 La démarche de conception d'un système mécatronique	6
1.3.1 Phase de conception (Branche descendante)	7
1.3.2 Intégration et validation du prototype (Branche ascendante)	8
1.4 La modélisation et la simulation	9
1.4.1 Définition	9
1.4.2 Processus de la simulation	9
1.4.3 Différents types de modèles de simulation	10
1.5 Les turbines éoliennes et les activités de recherche	13
1.5.1 Introduction	13
1.5.2 Définition de la turbine éolienne	13
1.5.3 Les différents types d'éoliennes	13
1.5.4 Principe de fonctionnement des turbines éoliennes à axe horizontal	14
1.5.5 Éléments constitutifs d'une turbine éolienne à axe horizontal	15
1.5.6 Les technologies d'éoliennes	16

1.5.7	Objectif	19
1.5.8	Conclusion	21
2	Les outils de modélisation des systèmes mécatroniques	22
2.1	Introduction	22
2.2	Aperçu des outils de modélisation	22
2.2.1	Approche de modélisation fonctionnelle	22
2.2.2	Approche de modélisation structurelle	24
2.2.3	Conclusion sur le choix de l'outil de modélisation	30
2.3	Le Langage Bond Graph	31
2.3.1	Les éléments du Bond Graph	32
2.3.2	La causalité d'un Bond Graph	37
2.3.3	Procédure de construction du Bond Graph	39
2.3.4	Chemin causal, boucle causale	39
2.3.5	L'inversion en langage Bond Graph	41
2.3.6	Les différents contextes dans lesquels la méthode d'inversion peut être utilisée	43
2.3.7	Exemple d'application : système d'actionnement d'un axe d'une machine à commande numérique	47
2.4	Conclusion	58
3	Contribution du Bond Graph à la modélisation et la commande des systèmes de production éoliennes	59
3.1	Introduction	59
3.2	Modélisation de la turbine	59
3.2.1	Modèle aérodynamique	60
3.2.2	Modèle mécanique	62
3.2.3	Modèle électrique	67
3.2.4	Modèle du système de calage	68
3.2.5	Modèle complet de la turbine éolienne	70
3.3	Stratégies de commande de la turbine éolienne	70
3.3.1	Zones de fonctionnement de la turbine éolienne	70
3.3.2	Stratégies de commande	71
3.4	Mise en œuvre de la commande	74
3.4.1	Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse	74
3.4.2	Limitation de la puissance extraite avec asservissement de l'angle de calage	79
3.5	Simulation et discussion	82
3.6	Conclusion	91
4	Modélisation mécatronique d'un système de production éolienne	92
4.1	Introduction	92
4.2	Modélisation mécatronique de la turbine éolienne	92
4.2.1	Modélisation de sous-système mécanique	94
4.2.2	Modélisation de sous-système aérodynamique	103
4.2.3	Modélisation de sous-système électrique	109
4.2.4	Modélisation de sous-système de calage	112
4.2.5	Modélisation de système complet	113
4.3	Simulation et discussion	114
4.4	Conclusion	119

5	Commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur Une MADA	121
5.1	Introduction	121
5.2	Description du système	121
5.3	Modélisation de la MADA	122
5.3.1	La transformation de Park	123
5.3.2	Modèle Bond Graph de la MADA	124
5.4	Modèle de la turbine sans convertisseur de puissance	126
5.5	Commande de la MADA	127
5.5.1	Description de la commande vectorielle utilisée	127
5.5.2	Le modèle Bond Graph inverse de la MADA	128
5.5.3	Formulation de la loi de commande à base du modèle inverse de la MADA	129
5.6	Résultats de Simulation	131
5.7	Conclusion	136
	Conclusion générale et perspective	137
	Références bibliographiques	146
	Annexe A : Éléments constitutifs de formalismes	147
	Annexe B : Méthodes de Ziegler et Nichols	152
	Annexe C : Paramètres de simulations	154



Liste des figures

1.1	Disciplines concernées par la mécatronique [16].	5
1.2	Architecture générale d'un système mécatronique.	6
1.3	Étapes de conception d'un système mécatronique (le cycle en V).	7
1.4	Cycle de conception d'un système industriel.	8
1.5	Étapes de la simulation.	10
1.6	Conversion de l'énergie cinétique du vent.	13
1.7	Éolienne à axe horizontal.	14
1.8	Éolienne à axe vertical.	14
1.9	Les composantes de l'aérogénérateur.	15
1.10	Éolienne directement connectée au réseau.	16
1.11	Caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone.	17
1.12	Génération à puissance électrique variable (pales fixes, décrochage aérodynamique).	17
1.13	Génération à puissance électrique constante (pales orientables).	18
1.14	Éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à cage.	19
1.15	Éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation.	20
1.16	Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse de mécanique et la vitesse du vent.	20
2.1	Exemple du système électromécanique.	24
2.2	Bond Graph de l'exemple du système électromécanique.	26
2.3	POG de l'exemple du système électromécanique.	27
2.4	PFD de l'exemple du système électromécanique.	27
2.5	Puzzles énergétiques de l'exemple du système électromécanique.	28
2.6	GIC de l'exemple du système électromécanique.	29
2.7	REM de l'exemple du système électromécanique.	30
2.8	Transfert de puissance entre un moteur électrique et une charge (a), Représentation d'un lien de puissance bond graph (b).	31
2.9	Éléments actifs : sources d'effort et de flux (a), sources d'effort et de flux modulés (b).	33
2.10	Représentation des éléments passifs.	33
2.11	Représentation bond graph de l'élément R (a), la résistance électrique (b), l'amortissement mécanique (c), la résistance hydraulique (d), résistance thermique (e).	34
2.12	Représentation Bond Graph de l'élément C (a), le condensateur électrique (b), le ressort mécanique (c), le réservoir de stockage (d).	35

2.13	Représentation bond graph de l'élément I (a), l'inductance électrique (b), l'inertie mécanique (c), l'inertie de fluide (d).	36
2.14	Représentation bond graph d'éléments multiports : 3 bobinages (a), condensateur à armature mobile (b), solénoïde à noyau mobile (c).	36
2.15	Représentation bond graph des jonctions 0 et 1.	37
2.16	Représentation bond graph de l'élément TF (a), transformateur électrique (b), réducteur de vitesse (c), levier mécanique (d), vérin hydraulique (e).	37
2.17	Représentation bond graph de l'élément GY (a), moteur électrique (b).	38
2.18	Détecteur d'effort imposant un flux nul (a), détecteur de flux imposant un effort nul (b).	38
2.19	Représentation Bond Graph du principe de causalité.	38
2.20	Chemin causal et boucle causale dans un Bond Graph.	41
2.21	Bicausalité.	42
2.22	Double source imposant l'effort et le flux (a), double détecteur d'effort et de flux (b).	42
2.23	Dimensionnement par modèles Bond Graph inverses : étape d'adéquation modèle/cahier des charges.	44
2.24	Dimensionnement par modèles bond graph inverse : étape de spécification.	45
2.25	Dimensionnement par modèles bond graph inverse : étape de sélection.	45
2.26	Dimensionnement par modèles bond graph inverse : étape de validation.	46
2.27	Dimensionnement par modèles Bond Graph inverses : étape de validation (suite).	47
2.28	Système d'actionnement d'un axe d'une machine à commande numérique.	48
2.29	Schéma technologique d'un système d'actionnement d'un axe d'une machine à commande numérique actionnée par un moteur à courant continu.	48
2.30	Modèle word bond graph d'un système d'actionnement d'un axe d'une machine à commande numérique actionnée par un moteur à courant continu.	49
2.31	Modèle Bond Graph acausal d'un système d'actionnement d'un axe d'une machine à commande numérique actionnée par un moteur à courant continu.	49
2.32	Modèle bond graph causal d'un système d'actionnement d'un axe d'une machine à commande numérique actionnée par un moteur à courant continu.	50
2.33	Modèle bond graph simplifié causal d'un système d'actionnement d'un axe d'une machine à commande numérique actionnée par un moteur à courant continu.	50
2.34	Simulation du système: vitesse de translation de la table mobile.	51
2.35	Trajectoire de la position de la table imposée par le cahier des charges	52
2.36	Profil de vitesse spécifié.	52
2.37	Dimensionnement du moteur électrique : étape d'adéquation.	52
2.38	Dimensionnement du moteur électrique : étape de spécification.	53
2.39	Schéma bloc du calcul de τ_m et ω_m	53
2.40	Domaines de fonctionnement requis en sortie du moteur électrique.	53
2.41	Dimensionnement du moteur électrique : étape de sélection.	54
2.42	Dimensionnement du moteur électrique : étape de validation.	54
2.43	Schéma bloc du calcul de $u(t)$ et $i(t)$	55
2.44	Domaines de fonctionnement requis en entrée du moteur électrique.	55
2.45	Schéma bloc de la commande issue de Bond Graph Inverse.	56
2.46	Modèle bond graph du système et sa commande.	57
2.47	Position de la table mobile.	57
3.1	Sous-systèmes de la turbine éolienne.	60
3.2	Vitesse spécifique du rotor.	61
3.3	Coefficient de puissance.	62
3.4	Modèle Matlab/Simulink du sous-système aérodynamique.	63
3.5	Modèle bond graph du sous-système aérodynamique.	63
3.6	Schéma technologique du sous-système mécanique.	64
3.7	Modèle Matlab/Simulink du sous-système mécanique de la turbine éolienne.	66
3.8	Modèle bond graph du train d'entraînement mécanique de la turbine éolienne.	67

3.9	Modèle bond graph de la tour de la turbine éolienne.	67
3.10	schéma technologique du système de calage.	68
3.11	Modèle Matlab/Simulink du sous-système de calage.	69
3.12	Modèle Bond Graph du sous-système de calage.	70
3.13	Modèle bond graph simplifié du sous-système de calage.	70
3.14	Modèle Matlab/Simulink complet de la turbine éolienne.	70
3.15	Modèle bond graph complet de la turbine éolienne.	71
3.16	Comparaison des comportements dynamiques entre le modèle mathématique par Matlab/Simulink et le modèle bond graph, la vitesse de rotation du rotor de la turbine éolienne.	72
3.17	La caractéristique puissance, vitesse du vent typique d'une turbine éolienne.	72
3.18	La caractéristique puissance, vitesse du rotor ω_r pour différentes valeurs de v	73
3.19	Régulation de la vitesse.	75
3.20	Modèle bond graph inverse.	77
3.21	Schéma bloc de la commande issue de Bond Graph inverse.	79
3.22	Fonction de transfert du système de calage.	79
3.23	Schéma bloc de commande de l'angle de calage par le contrôleur PID.	80
3.24	Modèle bond graph inverse du système de calage.	80
3.25	Schéma bloc de la commande de l'angle de calage issu de Bond Graph inverse.	81
3.26	Modèle Matlab/Simulink de la turbine éolienne et sa commande par le contrôleur conventionnel PID.	82
3.27	Modèle bond graph de la turbine éolienne et sa commande par le bond graph inverse.	83
3.28	Vitesse du vent (profil de test).	84
3.29	Vitesse du générateur (profil de test).	84
3.30	Puissance générée (profil de test).	85
3.31	Coefficient de puissance (profil de test).	85
3.32	Couple du générateur (profil de test).	85
3.33	l'angle de calage (profil de test).	86
3.34	déplacement de la tour (profil de test).	86
3.35	Vitesse du vent ($12m/s$).	86
3.36	Vitesse du générateur ($12m/s$).	87
3.37	Couple du générateur ($12m/s$).	87
3.38	Puissance générée ($12m/s$).	87
3.39	Coefficient de puissance ($12m/s$).	88
3.40	l'angle de calage ($12m/s$).	88
3.41	déplacement de la tour ($12m/s$).	88
3.42	Vitesse du vent ($18m/s$).	89
3.43	Vitesse du générateur ($18m/s$).	89
3.44	Couple du générateur ($18m/s$).	89
3.45	Puissance générée ($18m/s$).	90
3.46	Coefficient de puissance ($18m/s$).	90
3.47	l'angle de calage ($18m/s$).	90
3.48	déplacement de la tour ($18m/s$).	91
4.1	Diagramme des interactions énergétiques.	93
4.2	Schéma block des interactions énergétiques entre sous-systèmes.	93
4.3	Représentation macroscopique de l'éolienne par bond graph à mots.	94
4.4	Modes de vibration pour une éolienne à axe horizontal.	95
4.5	Section des pales (a), Modèle dynamique de la pale (b).	96
4.6	Représentation Newtonie de l'élément de la pale.	96
4.7	Représentation Bond Graphe de la pale.	98
4.8	Modèle Bond Graphe de la pale.	99
4.9	Simulation de couple d'une pale.	99
4.10	Représentation Bond Graph du moyen.	100

4.11	Modèle Bond Graph du moyen.	100
4.12	Représentation de la tour.	101
4.13	Représentation Bond Graph de la tour.	102
4.14	Schéma du multiplicateur de vitesses.	102
4.15	Modèle cinématique du train épicycloïdal.	103
4.16	Modèle dynamique du train épicycloïdal (a), modèle Bond Graph du train épicycloïdal (b).	103
4.17	Modèle dynamique du train parallèle (a), modèle Bond Graph du train parallèle (b).	104
4.18	Modèle Bond Graph complet du multiplicateur.	104
4.19	Simulation de multiplicateur de vitesses.	105
4.20	Modèle Bond Graph du sous-système mécanique.	106
4.21	Section d'un élément de la pale à un rayon r	107
4.22	Coefficients C_D , C_L et C_m de la pale pour le profil NACA 4415.	107
4.23	Modèle Bond Graph du sous-système aérodynamique.	108
4.24	Modèle de simulation du C_p	109
4.25	Courbe de C_p en fonction de λ	109
4.26	Représentation Bond Graph de la machine asynchrone.	110
4.27	Modèle Bond Graph du sous-système électrique.	111
4.28	Simulation du sous-système électrique.	112
4.29	Modèle Bond Graph du sous-système calage.	112
4.30	Modèle Bond Graph complet de la turbine éolienne.	113
4.31	Efforts aérodynamiques (profil constant).	114
4.32	Vitesses et couples (profil constant).	115
4.33	Courants statorique (profil constant).	115
4.34	Puissances (profil constant).	116
4.35	C_p et λ (profil constant).	116
4.36	Déviations des pales et la tour et les vibrations de multiplicateur (profil constant).	116
4.37	Efforts aérodynamiques (profil variable).	117
4.38	Vitesses et couples (profil variable).	117
4.39	Courants statorique (profil variable).	118
4.40	Puissances (profil variable).	118
4.41	C_p et λ (profil variable).	118
4.42	Déviations des pales et la tour et les vibrations de multiplicateur (profil variable).	119
5.1	Éolienne à vitesse variable avec un générateur asynchrone à double alimentation.	122
5.2	Modèle de Park de la MADA.	123
5.3	Modèle Bond Graph de la transformation de Park.	124
5.4	Circuit équivalent de la MADA dans le repère de Park.	125
5.5	Modèle Bond Graph de la MADA dans le repère de Park.	126
5.6	Modèle Bond Graph de la turbine sans convertisseur de puissance.	126
5.7	Principe du contrôle vectoriel.	128
5.8	Le Bond Graph inverse de la turbine avec MADA.	129
5.9	Schéma de contrôle du couple de la MADA.	130
5.10	Schéma de contrôle de la MADA.	132
5.11	Réponse pour un profil du vent constant.	133
5.12	Couple pour un profil du vent constant.	133
5.13	Puissance pour un profil du vent constant.	134
5.14	Réponse pour un profil du vent variable.	134
5.15	Couple pour un profil du vent variable.	135
5.16	Réponse pour un profil du vent variable.	135
5.17	Réponse indicielle du processus.	153



Liste des tableaux

2.1	Variables de puissance et d'énergie (et leurs unités SI) associées à différents domaines de la physique	32
2.2	Causalités possibles pour les différents éléments bond graph	40
2.3	Gain des éléments passifs.	41
2.4	Valeurs des grandeurs du dispositif (Moteur à courant continu+Vis-écrou).	51
3.1	Paramètres du système à deux masses et de la tour	65
5.1	Récapitulatif des éléments constitutifs du formalisme POG [ZANASI 96]	147
5.2	Récapitulatif des éléments constitutifs du formalisme PFD [SCHÄ-NFELD 04]	148
5.3	Récapitulatif des éléments constitutifs du formalisme Puzzles énergétiques [PIQUET 00]	149
5.4	Récapitulatif des éléments constitutifs du formalisme GIC [HAUTIER 96]	150
5.5	Récapitulatif des éléments constitutifs du formalisme REM [BOUSCAYROL 03]	151
5.6	Paramètres PID obtenus à partir d'une réponse indicielle	152
5.7	Paramètres PID obtenus à partir du point critique	153



Principales Notations

Variables

X	Variable d'état
Y	Variable de sortie
u	Variable d'entrée
v	Vitesse du vent (m/s)
T_a	Couple aérodynamique ($N.m$)
F_T	Force de poussée (N)
P_a	Puissance aérodynamique (W)
λ	Vitesse spécifique
β	Angle du calage ($^\circ$)
ω_r	Vitesse de rotation du rotor (rad/s)
ω_g	Vitesse de rotation du générateur (rad/s)
C_p	Coefficient puissance
C_q	Coefficient du couple aérodynamique
C_T	Coefficient de la force de poussée
F_{yi}	Force généralisée suivant l'axe y (N)
F_{zi}	Force généralisée suivant l'axe z (N)
M_{xi}	Moment généralisé de torsion autour de l'axe x ($N.m$)
M_{yi}	Moment généralisé de flexion autour de l'axe y ($N.m$)
M_{zi}	Moment généralisé de flexion autour de l'axe z ($N.m$)
y_i	Déplacement généralisé suivant l'axe y m
z_i	Déplacement généralisé suivant l'axe z m
θ_{xi}	Déplacement généralisé autour de l'axe x m
θ_{yi}	Déplacement généralisé autour de l'axe y m
θ_{zi}	Déplacement généralisé autour de l'axe z m

Paramètres des modèles

A	Matrice d'état
B	Matrice de commande
C	Matrice d'observation
D	Matrice d'action directe
S	Aire de la surface balayée par le rotor (m^2)
ρ	Masse volumique de l'air (Kg/m^3)
R	Rayon de l'aire balayée par le rotor (m)
P_n	Puissance nominale de la turbine (W)
ω_{nom}	Vitesse nominale de la turbine (rad/s)
ω_{ref}	Vitesse de référence (rad/s)
J_r	inertie des masse du côté du rotor ($kg.m^2$)
J_g	inertie des masse du côté du générateur ($kg.m^2$)
m_t	masse de la tour (kg)
K_{ms}	coefficient de torsion sur l'arbre lent ($N.m/rad$)
K_{hs}	coefficient de torsion sur l'arbre rapide ($N.m/rad$)
K_t	coefficient de rigidité de la tour (N/m)
D_{ms}	coefficient d'amortissement sur l'arbre lent ($N.m.s/rad$)
D_{hs}	coefficient d'amortissement sur l'arbre rapide ($N.m.s/rad$)
D_r	coefficient de frottements externes du rotor ($N.m.s/rad$)
D_g	coefficient de frottements externes du générateur ($N.m.s/rad$)
D_t	coefficient d'amortissement de la tour ($N.s/m$)
N_g	rapport de transmission du multiplicateur
ω_r	vitesse angulaire du rotor (rad/s)
ω_g	vitesse angulaire du générateur (rad/s)
y_t	déplacement de la tour (m)
T_a	couple aérodynamique ($N.m$)
T_a	couple électromécanique de la génératrice ($N.m$)
T_{ms}	couple de l'arbre lent ($N.m$)
T_{hs}	couple de l'arbre rapide ($N.m$)

Notations Bond Graph

e	Variable d'effort
f	Variable de flux
p	Variable de moment
q	Variable de déplacement
$(M)Se$	Source d'effort (modulé)
$(M)Sf$	Source de flux (modulé)
$(M)TF$	Transformateur (modulé)
$(M)GY$	Gyrateur (modulé)
I, C	"Eléments de stockage d'énergie scalaire ou multiport de type inertiel et de type capacitif"
R	Elément de dissipation d'énergie scalaire ou multiport
$0, 1$	Jonction 0, jonction 1

Acronymes

IEA	International Energy Agency
TCMS	Technical Committee on Mechatronic Systems
HIL	Hardware In the Loop
AFB	Analyse Fonctionnelle du Besoin
AFT	Analyse Fonctionnelle Technique
FAST	Function analysis system technique
SADT	Structured Analysis and Design Technique
ODE	Ordinary Differential Equations
DAE	Differential Algebraic Equations
BGM	Bond Graph à Mots
WBG	Word Bond Graph
POG	Power Oriented Graphs
PFD	Power Flow Diagram
GIC	Graphe Informationnel Causal
REM	Représentation Énergétique Macroscopique
PID	Proportionnel Intégrateur Dérivateur
BGI	Bond Graph Inverse
MADA	Machine asynchrone à double alimentation



Introduction générale

Les travaux de cette thèse ont été réalisés par M. Zakaria KHAOUCH au sein du Laboratoire de Génie Industriel de la FST de Béni Mellal. L'objectif majeur de ce travail est de montrer comment les approches mécatronique, en termes de méthodes et d'outils, peuvent contribuer efficacement à la modélisation, l'analyse, la commande et la maîtrise de la dynamique des systèmes complexes multidisciplinaires, en application aux systèmes de production d'énergie électrique plus précisément les turbines éoliennes.

Selon l'Agence d'Énergie Internationale (International Energy Agency (IEA)), les besoins énergétiques dans le monde avant l'année 2030 seront presque soixante pour cent plus élevés qu'à l'heure actuelle [1]. Pour répondre à ces exigences, et loin de l'utilisation des énergies fossiles polluantes et des centrales nucléaires, plusieurs pays se sont tournés vers de nouvelles formes d'énergie dite "*renouvelables*" [2]. Ces formes sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Parmi ces sources renouvelables, l'énergie éolienne occupe la deuxième place derrière l'énergie solaire. La production d'électricité à base de l'énergie éolienne au niveau mondial, qui ne dépassait pas $4800MW$ en 1995, a atteint $382219MW$ en 2013. En 2020, leur scénario prévoit environ $832000MW$ de puissance installée [1, 3, 4].

À l'heure actuelle, la forme qui utilise la technologie éolienne est nommée l'aérogénérateur. C'est une machine qui produit de l'énergie électrique à partir de l'énergie cinétique du vent [5]. Sa puissance varie de quelques watts jusqu'à plusieurs mégawatts. La majorité des systèmes commerciaux actuels sont des turbines éoliennes à axe horizontal avec des rotors à trois pales (tripales) [6]. L'utilisation de ces aérogénérateurs présente des avantages importants. En effet, ils sont l'un des moyens les plus écologiques de génération de l'électricité sans oublier leurs caractères inépuisables. Par ailleurs, ces systèmes présentent des comportements dynamiques difficiles à maîtriser et leurs caractères multidisciplinaires fait que leurs contrôles constituent un vrai défi pour la recherche scientifique.

Plusieurs travaux sur le contrôle des turbines éoliennes ont été réalisés dont l'impact sur les performances des dernières générations d'éoliennes devient de plus en plus important. Néanmoins, ces travaux utilisent des approches classiques pour la modélisation et le contrôle des turbines éoliennes et ils se focalisent sur l'étude de l'un de ces sous-systèmes selon la discipline du chercheur. Cependant, les turbines éoliennes sont des systèmes pluridisciplinaires et le lieu d'interactions entre différentes technologies. L'approche classique de modélisation n'étant donc plus adéquate, il est nécessaire encore d'introduire plus d'intelligence et plus de flexibilité dans le contrôle des aérogénérateurs. Dans cet

esprit, des approches novatrices avancées de modélisation et de contrôle des turbines éoliennes sont nécessaires et devraient aider l'industrie éolienne à dépasser les limites actuelles, en vue de développer des éoliennes encore plus puissantes et plus fiables. Les technologies et les sciences de contrôle et de modélisation des nouvelles générations éoliennes sont donc un sujet important pour les instituts de recherche et de l'industrie.

Dans ce contexte, cette thèse s'intéresse donc à mettre l'accent sur la modélisation et le contrôle de différentes technologies des turbines éoliennes du point de vue mécatronique: c'est-à-dire de considérer le système éolien comme un système mécatronique multidisciplinaire comprenant différents domaines de la physique comme l'aérodynamique, la mécanique, l'électricité et la commande. Le principal défi de cette approche mécatronique réside dans son caractère multi-domaines. Dans la mesure où les composantes physiques hétérogènes constituant le système, elles sont reliées entre elles en une unité homogène d'exploitation fonctionnelle permettant :

- La maîtrise du comportement dynamique du système.
- L'identification et l'optimisation des composantes constituant le système.
- Le contrôle et la commande du système dans le but de garantir sa fiabilité, réduire les charges sur les composants et augmenter le captage d'énergie par le système.

Le présent mémoire se divise en cinq chapitres.

Le premier est consacré à la définition du cadre et à l'orientation des travaux. Puis la notion de systèmes mécatroniques et leur complexité sont définies. La démarche de conception est ensuite présentée. À la fin de ce chapitre, un état de l'art sur les turbines éoliennes est exposé. Des notions de base sur la technologie éolienne ont été abordées, l'architecture de la chaîne de conversion d'énergie est rapportée en association avec les différents types de génératrices.

Dans le deuxième chapitre, nous abordons une étude des outils de représentation multi-physique ayant un intérêt notable pour la modélisation des éoliennes. Sur la base de cette étude, l'outil Bond Graph est choisi pour la représentation structurelle de la turbine éolienne.

Le troisième chapitre porte sur le développement de deux méthodes (de modélisation et celle de commande), en utilisant, d'une part, la démarche classique et, d'autre part, l'approche Bond Graph. Par la suite, une comparaison entre ces deux méthodes a montré que la modélisation par l'outil Bond Graph est la plus efficace.

Le quatrième chapitre rapporte une représentation unifiée et multidisciplinaire de la turbine éolienne. Une description détaillée basée sur l'outil Bond Graph est proposée. Les sous-systèmes constituant l'éolienne sont modélisés en détail afin de construire un modèle complet de la turbine et qui prend en compte tous les phénomènes dynamiques présents dans le système.

Le dernier chapitre traite de la modélisation et de la commande d'une turbine éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation. Le modèle dans le repère de Park est développé en utilisant le formalisme Bond Graph. Le dispositif de commande de cette configuration d'éolienne est ensuite présenté à base du Bond Graph bicausal.

Cette thèse est clôturée par une conclusion générale résumant les résultats les plus significatifs, mettent en relief les principaux enseignements et dressant une liste de travaux jugés intéressants à réaliser prochainement.

CHAPITRE

1

Contexte et objectifs de thèse

1.1 Introduction

La modélisation est une phase capitale pour l'analyse et la maîtrise du comportement de tout système. La première étape de modélisation consiste en la détermination des variables d'entrée et de sortie. La deuxième étape consiste en la détermination des relations entre ces variables en se basant sur les concepts fondamentaux de la physique. La phase de modélisation n'est pas évidente pour un système complexe tel que la turbine éolienne, particulièrement lorsqu'il s'agit de représenter le système dans sa globalité. Elle présente une difficulté importante liée aux forts couplages existants entre sous-systèmes et au nombre important des variables caractéristiques. Pour répondre à la complexité et à la multidisciplinarité de ces systèmes, de nouvelles approches de conception dit *mécatronique* sont apparus, fondamentalement pluridisciplinaires, et qui, jusqu'alors, n'était vue que comme l'assemblage de différentes approches orientées métiers.

Ce chapitre est consacré au cadre général de nos travaux. Après avoir défini la notion de système mécatronique. Nous proposons ensuite un bref état de l'art sur les systèmes de conversion d'énergie éolienne sous une forme assez descriptive exposant les principaux sous-systèmes et leurs interactions, ainsi que les différents composants constituant l'aérogénérateur.

1.2 Généralités sur la mécatronique

Le terme mécatronique (mechatronics en anglais) a été proposé la première fois par un ingénieur de Yaskawa Electric du Japon en 1969 [7] pour désigner le contrôle des moteurs électriques par ordinateur. Il définit la Mécatronique comme une discipline transverse de l'électronique et de la mécanique (mécanique au sens large incluant l'hydraulique, la thermique, etc.). Depuis, sa signification a encore évolué. La mécatronique n'est plus simplement à l'interface de ces deux domaines et inclut bien d'autres disciplines comme celles issues des technologies de l'information (acquisition de données, commande, intelligence artificielle, ou encore l'hybridation...).

La mécatronique devrait être considérée comme une combinaison intelligente entre les domaines de l'ingénierie existants, c'est une façon de voir les choses et les problèmes. La mécatronique est une philosophie multidisciplinaire, c'est une discipline intégratrice. Contrairement à la plupart des autres domaines d'ingénierie, génie mécatronique se caractérise par une approche généraliste plutôt qu'une attitude spécialisée.

À ce titre, de nombreuses définitions peuvent être trouvées dans la littérature. Parmi elles, nous

pouvons citer :

La définition du journal international *Mechatronics*, parue pour la première fois en 1991 [8] : « *Mechatronics in its fundamental form can be regarded as the fusion of mechanical and electrical disciplines in modern engineering process. It is a relatively new concept to the design of systems, devices and products aimed at achieving an optimal balance between basic mechanical structures and its overall control.* »;

Celle du journal international IEEE Transactions on Mechatronics, créée en 1996 est : « *Mechatronics is the synergetic combination of mechanical engineering with electronics and intelligent computer control in the design and manufacturing of industrial products and processes* » [9, 10];

la définition choisie par le "TCMS Technical Committee on Mechatronic Systems", fondée en 2000 [11] : « *Beaucoup de procédés techniques et de produits dans le domaine de la mécanique et électrique montrent une intégration croissante de la mécanique avec l'électronique et de traitement de l'information. Cette intégration se situe entre les composants (matériel) et la fonction axée sur l'information (logiciel), ce qui entraîne des systèmes intégrés, appelés systèmes mécatroniques* »;

Selon le Comité Consultatif de Recherche Industrielle et de Développement de la Communauté Européenne (Industrial Research and Development Advisory Committee of the European Community). « *La mécatronique est la combinaison synergique de l'ingénierie mécanique de précision, de la commande électronique et du système informatique dans la conception des produits et des processus de fabrication* » [12, 13, 14].

La première norme spécifiquement mécatronique « NF E01-010 » a été élaborée en 2008. Cette norme a pour objectif de proposer à la communauté industrielle et scientifique une terminologie commune à l'échelle nationale puis internationale (une soumission au niveau européen est en projet). Visant à améliorer la compréhension mutuelle des différents intervenants d'un projet mécatronique (experts, intégrateurs, fournisseurs, service marketing...), un certain nombre de termes et définitions propres à la mécatronique y est ainsi précisé. La mécatronique est notamment définie comme : « *Une démarche visant l'intégration en synergie de la mécanique, l'électronique, l'automatique et l'informatique dans la conception et la fabrication d'un produit en vue d'augmenter et/ou d'optimiser sa fonctionnalité* » [15].

Ces références définissent les systèmes mécatroniques comme des systèmes dont la conception fait appel principalement à quatre champs disciplinaires (Figure 1.1) comme il est mentionné dans [16] :

- la mécanique, sous la forme de mécanismes et de matériaux (statique, dynamique, RDM, etc.), mais également d'hydraulique, de pneumatique...
- l'électronique de commande et de puissance (microcontrôleur, ponts de puissance, convertisseurs A/N et N/A, etc.),
- l'informatique (temps réel, réseaux, traitement du signal, etc.),
- l'automatique (contrôles linéaires et non linéaires, stratégies de contrôle-commande, etc.).

Aujourd'hui, la mécatronique est très présente dans notre vie quotidienne ainsi que dans le milieu industriel. Elle touche de nombreuses applications dans des domaines variés comme :

- La consommation grand public : appareil photo et vidéo, robot aspirateur, téléviseur, téléphone portable...
- Les appareils de domotique : stores automatisés, ouvre-portail, alarme...
- La production : machines-outils, robots industriels,...

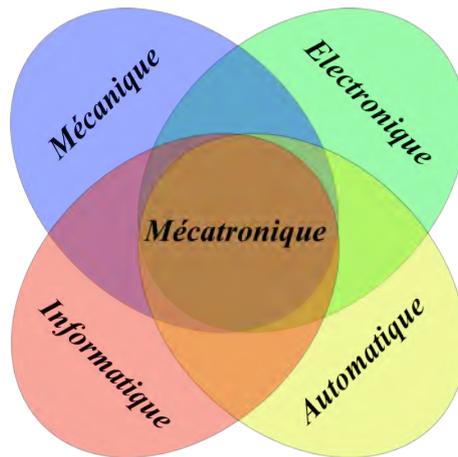


Figure 1.1: Disciplines concernées par la mécatronique [16].

- Le transport : véhicule hybride, transporteur personnel...
- Le médical : respirateurs, pompes, cœur artificiel, aussi bien dans le matériel (robot de chirurgie par exemple) que dans l'assistance ou le remplacement d'organes humains (prothèse intelligente par exemple), on parle alors de bio mécatronique ;
- L'aéronautique : avion, système de navigation, système d'armement...
- La recherche spatiale : satellite, robot explorateur...
- L'énergie renouvelable : traceur de soleil, système d'orientation des pales d'une éolienne...

Dans le cadre de ces travaux, les applications dans le secteur des énergies renouvelables ont été particulièrement suivies, car elles peuvent constituer une source d'apports scientifiques et technologiques dans l'étude des comportements dynamiques des systèmes multidisciplinaires comme les éoliennes.

1.2.1 Architecture générale d'un système mécatronique

D'après les définitions précédentes, il est possible d'établir un schéma global de l'architecture d'un système mécatronique [17] (Figure 1.2) qui permet de décrire les différents flux d'interconnexion des différents composants tels que :

- L'alimentation énergétique du système représentée par le sous-système dispositifs de fourniture d'énergie,
- La modulation de puissance, permettant de piloter le transfert d'énergie entre les dispositifs de fourniture d'énergie et les actionneurs, représentée par le sous-système modulateur de puissance,
- La conversion et la transmission de l'énergie pour l'adapter aux besoins de la charge représentées par les sous-systèmes actionneurs et éléments d'adaptation d'énergie,
- L'objet de l'actionnement caractérisé par ses degrés de liberté énergétiques et représenté par le sous-système charge.

1.2.2 Définitions des systèmes mécatroniques complexes

De nombreuses définitions des systèmes complexes existent [18, 19, 20]. Nous retenons les caractéristiques suivantes pour définir la notion de complexité du système : « *multi-physique* », « *multi-phases* », « *multi-échelles* », « *multi-interactions* ».

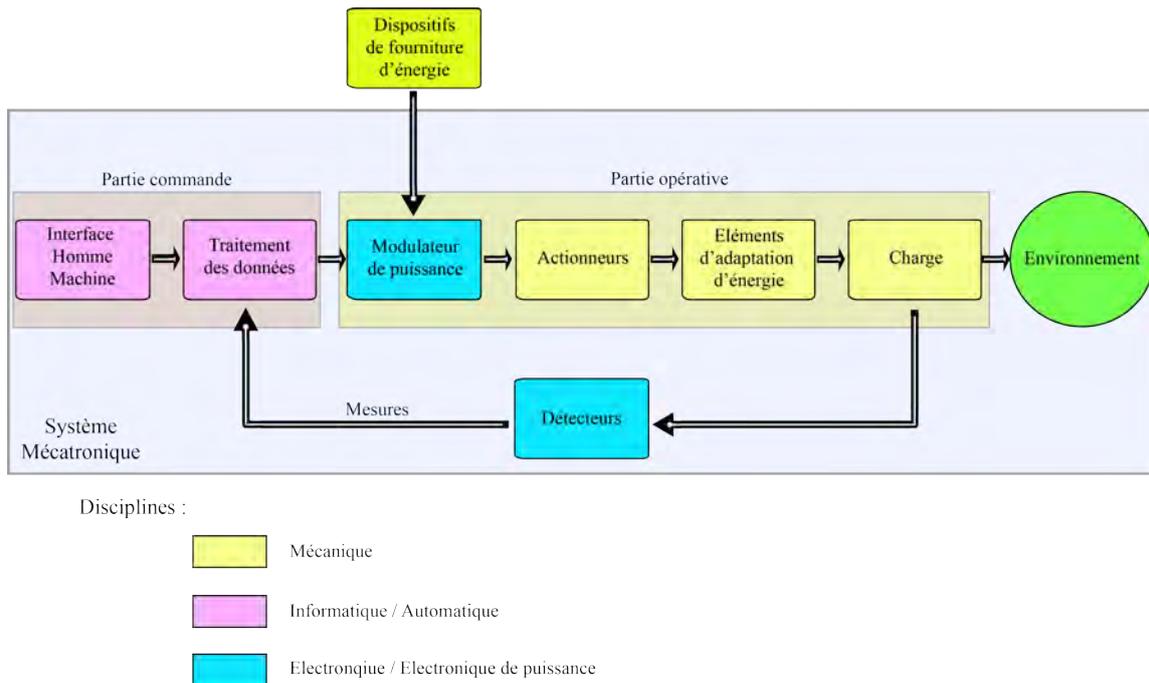


Figure 1.2: Architecture générale d'un système mécatronique.

Un système « *multi-physique* » est un système composé d'éléments dont les comportements sont régis par différents domaines de la physique : mécanique, électronique, hydraulique, pneumatique, etc. Dans le cas de la turbine éolienne, la présence des domaines aérodynamique, mécanique, électrique et de contrôle-commande justifie le caractère « multi-physique » de ce système.

Un système « *multi-phases* » est caractérisé par différentes phases de fonctionnement au cours de son cycle de vie. Dans le cadre des systèmes considérés à savoir les turbines éoliennes, il comporte de nombreuses phases de fonctionnement selon la vitesse du vent.

Un système « *multi-échelles* » est caractérisé par des lois physiques de différentes échelles : constantes réparties/ localisées, microscopiques/ macroscopiques. Les turbines éoliennes équipées des boîtes de vitesse qui peuvent être modélisées par un modèle multi-corps à paramètres localisés, et des pales et de la tour qui sont des structures déformables nécessitent des modèles complémentaires à paramètres répartis.

Un système « *multi-interactions* » comporte un grand nombre d'éléments en relation les uns avec les autres et dont les interactions peuvent faire émerger de nouvelles propriétés. Cette caractéristique des systèmes complexes souligne leur caractère holistique reposant sur le principe que « le tout est plus grand que la somme des parties ». Dans le cas de la turbine éolienne, elle comporte un grand nombre de solides liés par des liaisons cinématiques ainsi que des interactions entre plusieurs domaines.

1.3 La démarche de conception d'un système mécatronique

La démarche de conception des systèmes mécatroniques peut être présentée par un cycle en V [21, 22, 23, 24, 25, 26, 27] (Figure 1.3). Ce cycle est décomposé en huit étapes. Les quatre étapes pour la branche descendante (appelée aussi approche de conception top-down) du cycle en V ont pour objectif la conception du système. Les quatre étapes pour la branche ascendante (appelée aussi approche de conception bottom-up) du cycle en V ont pour objectif la partie intégration et validation du système.

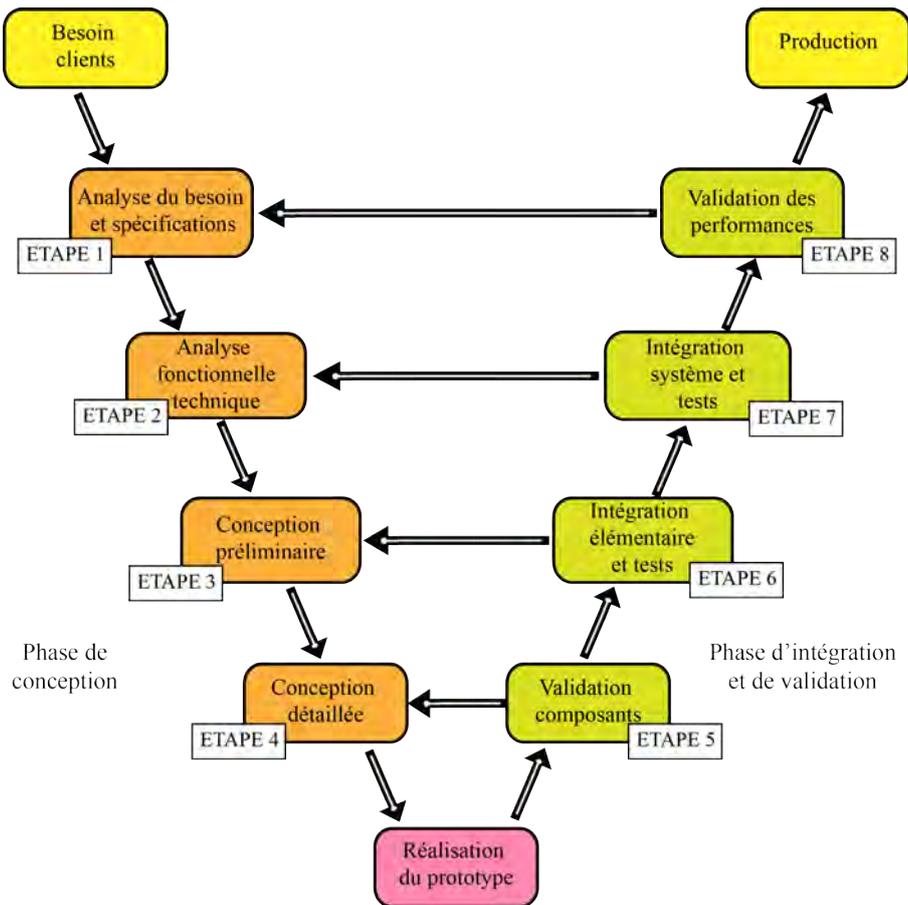


Figure 1.3: Étapes de conception d'un système mécatronique (le cycle en V).

1.3.1 Phase de conception (Branche descendante)

L'analyse fonctionnelle permet tout d'abord d'aboutir à l'identification et la traduction du besoin puis à sa formulation en objectifs à atteindre par le système. Ensuite la conception préliminaire dans un premier temps puis détaillée.

a- Analyse du besoin et spécifications

L'analyse du besoin [28] permet tout d'abord de caractériser le besoin exprimé par un client potentiel. Elle s'appuie généralement sur un graphe des prestations (encore appelée « bête à cornes »). La définition des spécifications (ou analyse fonctionnelle du besoin (AFB)) [29] permet ensuite d'identifier précisément en termes de fonctions (de services et contraintes), les besoins à satisfaire ou les services à rendre pour que l'utilisateur soit satisfait. Elle peut s'appuyer sur le diagramme Pieuvre et découle sur la rédaction du cahier des charges fonctionnelles.

b- Analyse fonctionnelle technique

L'analyse fonctionnelle technique (AFT) [16, 31] permet d'analyser de quelle manière une solution répond aux besoins et aux exigences [30]. Elle permet d'analyser l'organisation interne du système étudié et de mesurer la réponse que le système apporte aux besoins et exigences du client. Le but est de transformer les fonctions de service issues de l'énoncé du cahier des charges fonctionnel en fonctions techniques élémentaires. L'analyse fonctionnelle technique peut se formaliser à l'aide d'outils comme le FAST, le SADT ou le Grafcet.

c- Conception préliminaire (ou pré-dimensionnement)

La phase de conception préliminaire encore appelée pré-dimensionnement, a pour objectif de déterminer l'architecture du système. Cette phase peut être, elle-même, décomposée en deux étapes [23]. La première vise à définir les éléments permettant de remplir les fonctions techniques définies lors de l'analyse fonctionnelle. Cette étape s'appuie sur un ensemble de choix à partir des principes de fonctionnement possibles et des technologies. La deuxième consiste à définir l'architecture du système à partir de l'assemblage des éléments qui ont été précédemment choisis. L'utilisation d'outils de modélisation structurels sera particulièrement adaptée à cette étape. Ces outils de modélisation structurels seront présentés dans le chapitre suivant.

d- Conception détaillée (ou dimensionnement)

La phase de conception détaillée, encore appelée dimensionnement, a pour objectif de préciser la définition du système pour l'architecture retenue. Cette phase peut être également décomposée en trois étapes [23]. La première consiste à spécifier fonctionnellement les composants. La deuxième vise à définir les composants. La troisième consiste à évaluer et choisir la définition complète du système.

1.3.2 Intégration et validation du prototype (Branche ascendante)

Cette étape a pour objectif de valider la conception du produit. Elle s'appuie généralement sur la réalisation d'une maquette physique (encore appelée prototype physique). Cette maquette physique a un rôle essentiel afin d'assurer la conformité du produit aux exigences des spécifications du cahier des charges. Néanmoins, les essais de validation effectués a posteriori sont coûteux et requièrent beaucoup de temps et de moyens. Aussi, les procédures utilisant des maquettes numériques (ou prototypes virtuels) ont-ils permis de réduire fortement la nécessité de recourir à des maquettes physiques [32]. En effet, comme on peut le constater sur la Figure 1.4, la durée accordée à chacune de ces étapes a varié au cours des dernières décennies. Dans le passé, la réalisation de « prototypes physiques » était systématique, et suivie d'une longue phase de mise au point faisant appel à des essais sur ces prototypes. De nos jours, des moyens et méthodes de calculs performants permettent de remplacer une partie de ces essais par des simulations numériques. Cette évolution a aidé les industriels à satisfaire leur besoin de réduction des délais de conception afin de diminuer les coûts. L'approche de simulation est donc utilisée le plus longtemps possible également dans la branche d'intégration comme il est mentionné dans [22].

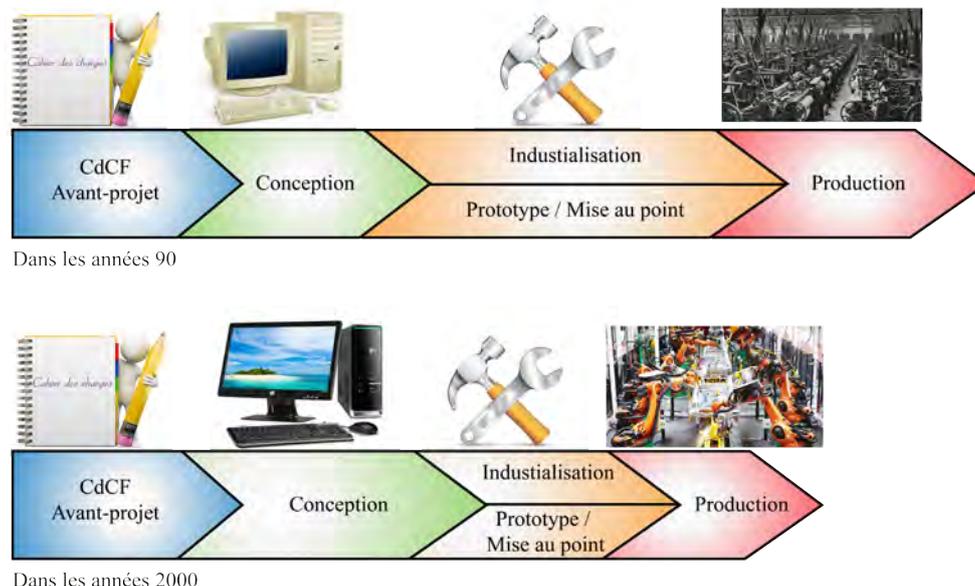


Figure 1.4: Cycle de conception d'un système industriel.

L'objectif de la branche d'intégration est d'assembler les différents sous-systèmes en respectant fidèlement l'architecture choisie et valider les travaux de conception par étapes. La validation se fait par boucle itérative avec les étapes descendantes de la branche de conception. La branche d'intégration peut être décomposée suivant les quatre étapes ci-dessous comme il est précisé dans [21].

a- Validation des composants

Lors de cette étape, les composants sont sélectionnés ou réalisés. Si leur comportement ne répond pas au cahier des charges composant, l'étape de conception détaillée est réalisée à nouveau. Ce processus est réitéré jusqu'à ce que la définition des composants satisfasse les exigences fonctionnelles demandées par le composant.

b- Intégration élémentaire et tests

Lors de cette étape, les sous-systèmes sont réalisés. Si le comportement d'un sous-système ne répond pas au cahier des charges du produit, l'étape de conception préliminaire est réalisée à nouveau. Ce processus est réitéré jusqu'à ce que la définition de l'architecture satisfasse les exigences fonctionnelles demandées pour le sous-système.

c- Intégration système et tests

Lors de cette étape, le système entier est réalisé. Si son comportement ne répond pas au cahier des charges fonctionnelles, l'étape analyse fonctionnelle technique est revue. Lors de cette étape, les lois de commande vont pouvoir être testées et validées sur le modèle complet lorsque cela est possible.

d- Validation du système

Durant cette dernière étape, le système entier doit être validé au regard des exigences fonctionnelles du système.

1.4 La modélisation et la simulation

1.4.1 Définition

Avant de présenter les étapes nécessaires à la réalisation d'une simulation, il est utile de rappeler quelques définitions. Ces définitions sont inspirées de [33] et [34].

La modélisation est une traduction des phénomènes physiques présentés dans un système sous forme des équations mathématiques définies dans le cadre d'une théorie. Les éléments constitutifs du modèle reposent sur des hypothèses associées à un objectif d'étude. Les hypothèses de modélisation constituent le domaine de validité du modèle.

La simulation calcule l'évolution (ou la réponse) théorique des grandeurs physiques d'un système sous l'effet des sollicitations extérieures. Son objectif est de prévoir le comportement d'un système à l'aide de modèles de simulation (aussi appelé « prototype virtuel »).

1.4.2 Processus de la simulation

La simulation peut être effectuée selon les étapes présentées sur la Figure 1.5 [33] :

a- La modélisation

Détermination des phénomènes physiques : Avant d'établir un modèle, les phénomènes physiques présentés dans le système doivent être identifiés. Un modèle dit pertinent est un modèle où seuls les phénomènes physiques ayant un effet sur l'objectif à atteindre sont modélisés.

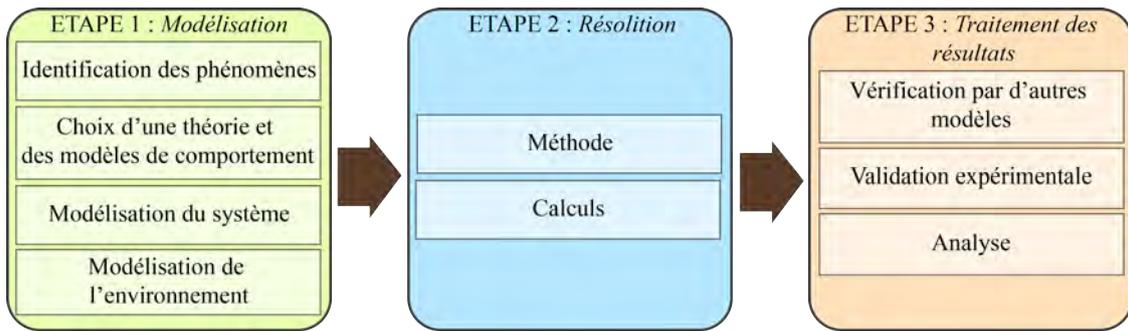


Figure 1.5: Étapes de la simulation.

Choix d'une théorie et des modèles de comportements : Une théorie est un ensemble de postulats, lois, principes et théorèmes qui permettent de dresser un modèle à partir de données et d'hypothèses initiales. L'exploitation du modèle construit permet de déterminer le résultat. Le choix d'une théorie dépend tout d'abord de l'objectif de la simulation puis, dans un second temps, de l'identification des phénomènes physiques.

Modélisation du système : Après avoir choisi une théorie, le modèle du système est défini. Il est composé des grandeurs caractéristiques des composants et des interactions entre les composants de ce système. Ce modèle peut, entre autres, contenir des informations sur la géométrie et les masses des composants.

Modélisation de l'environnement : Après avoir modélisé le système, l'interaction du système avec l'extérieur est ensuite modélisée.

b- Résolution

Cette étape a pour objectif, tout d'abord de déterminer une méthode convenable pour la résolution du problème mathématique défini par l'ensemble : d'une théorie, de lois de comportements, d'hypothèses simplificatrices, du modèle du système et de l'environnement. Puis, dans un second temps de sélectionner un calculateur, c'est le logiciel utilisé ou un individu qui applique les calculs définis dans la méthode précédemment définie.

c- Analyse des résultats

Lors de cette dernière étape, les résultats sont analysés. Suivant l'objectif de la simulation, les résultats attendus peuvent être qualitatifs ou quantitatifs comme la précise [35]. Dans le cas d'une approche qualitative, les résultats sont généralement seulement vérifiés à l'aide d'une autre méthode de modélisation. Dans le cas d'une approche quantitative, les résultats sont confrontés aux résultats d'essais. Une fois vérifiés théoriquement ou validés expérimentalement, les résultats sont alors comparés aux objectifs de performances qui ont été définis dans le cahier des charges.

1.4.3 Différents types de modèles de simulation

Durant le processus de conception d'un système mécatronique, différents types de modèles de simulation¹ sont utilisés. Les principaux vont être présentés selon plusieurs classifications : l'objectif de simulation, le niveau de détails, leur mode d'obtention ou encore leur forme. Cette formalisation a été synthétisée principalement à partir des références suivantes [17, 24, 36, 37]. Elle a pour objectif de nous aider à définir la simulation par modèle Bond Graph, qui sera présentée dans le chapitre suivant.

¹ Afin de clarifier cette terminologie, il est important de préciser que la classe des modèles de simulation appartient à une classe de modèles encore plus générale appelée « modèles de conception » [38, 39]. Cette classe de modèles de conception regroupe tous les modèles permettant un travail de synthèse pour un objectif de conception (simulation, analyse, commande, etc.).

a- Classification selon l'objectif de simulation

Suivant l'étape de conception considérée, l'objectif de la simulation sera différent : prédiction des performances d'une architecture en phase de pré-dimensionnement, définition complète de l'architecture choisie (géométrie, choix des matériaux...) en phase de dimensionnement et enfin aide à la validation du système. Les modèles que l'on trouve dans ces étapes peuvent être qualifiés de modèle de fonctionnement ou de modèle de dimensionnement [22].

b- Classification selon le niveau de détails

Le niveau de détails utilisé dans les modèles s'accroît généralement dans la partie descendante du processus de conception avant de diminuer dans la partie ascendante du processus de conception [36]. C'est la raison pour laquelle la classification selon l'objectif de simulation et celle sur le niveau de détails ont été distinguées.

b.1- Modèles logiques

Les modèles logiques [37] sont des modèles dits à paramètres localisés (lumped-parameter models en anglais). Ils sont construits à partir des éléments caractéristiques de la chaîne de puissance d'un système. La première formalisation de ces modèles se présente généralement sous la forme de schémas physiques : cinématiques, électriques, hydrauliques, etc. Les modèles associés sont discrets en espace et en temps [24]. Ils sont définis mathématiquement par des équations différentielles ordinaires (Ordinary Differential Equations ODE) ou d'équations algèbro-différentielles (Differential Algebraic Equations DAE). Ces modèles peuvent être classés en deux catégories : les modèles fonctionnels et les modèles structurels [34, 40, 41].

Les modèles fonctionnels : sont définis comme une association de sous-modèles. Ces derniers décrivent le comportement des sous-systèmes associés sous la forme de modèles entrés/ sortis. Ces modèles utilisent soit directement les équations analytiques ou numériques du système ou leurs mises en forme en schémas-blocs. Lorsque les schémas-blocs sont connectés, le modèle obtenu permet la simulation. Le schéma-bloc traduit plus le schéma de calcul du comportement du système que sa composition structurelle comme le souligné [42]. L'objectif de ce type d'approche est l'évaluation et la validation de performances du système. Ce type de modèles peut être particulièrement adapté pour la commande, car, en mettant en évidence les entrées et les sorties du système, il prépare l'étape de détermination de la commande du système étudié.

Ce type de modèles peut être réalisé à partir de différents logiciels comme : entre autres : Maple ou Mathematica pour les développements analytiques, Matlab pour les développements numériques, MATLAB-Simulink pour la modélisation par schémas-bloc, etc.

Les modèles structurels : ² se définissent comme l'interconnexion d'éléments suivant la structure physique du système. La modélisation structurelle consiste à déterminer les éléments et la structure (les relations entre les éléments) du système permettant de réaliser les fonctions techniques du système. Les modèles structurels sont généralement destinés à l'analyse du système et à la conception, car leur réalisation nécessite seulement (si on schématise à l'extrême) l'assemblage de sous-systèmes en suivant la même architecture que le système réel sans analyse préalable à réaliser sur la façon de connecter les différents sous-systèmes. Le Bond Graph qui sera l'outil privilégié dans cette thèse et qui sera détaillé par la suite permet d'ailleurs d'avoir, en même temps, une approche structurelle et comportementale.

² Ce type de modèle structurel ne doit pas être confondu avec la notion d'analyse structurelle que l'on retrouve dans [17, 38]. Les modèles logiques structurels font référence à une classe de modèles où la topologie du système détaillant les éléments et leurs interactions apparaît de manière explicite. Par contre, l'analyse structurelle, quant à elle, fait référence à une analyse d'un modèle qui se base uniquement sur les propriétés structurelles des relations de ce modèle c'est-à-dire les propriétés de ces relations indépendamment des valeurs numériques des paramètres de ces relations.

Ce type de modèles peut être réalisé à partir de différents logiciels comme entre autres : des logiciels spécifiques multicorps comme LMS Virtual Lab, des logiciels comme openmodelica, LMS Imagine Lab, Dymola pour la modélisation à partir du langage Modelica, 20-sim pour les modèles Bond Graph, etc.

b.2- Modèles géométriques

Les modèles géométriques [17, 24, 36] visent à la réalisation d'une « maquette numérique » globale et pluri-technologique intégrant la définition des formes géométriques, les lois de comportements des matériaux et parfois même des cartes électroniques. Ils permettent notamment de vérifier les composants choisis lors de la phase de dimensionnement.

Ce type de modèles peut être réalisé à partir de différents logiciels comme, entre autres : CATIA V6, Abaqus et bien d'autres, etc. Il a essentiellement pour objectif le dimensionnement de chaque composant du système.

c- Classification selon leur mode d'obtention

Selon le mode d'obtention du modèle, on peut distinguer les deux catégories suivantes [43].

c.1- Modèles de connaissance

Un modèle de connaissances se présente sous la forme d'équations mathématiques dont les paramètres représentent des grandeurs caractéristiques du phénomène étudié. Il est généralement élaboré à partir des lois de conservation de physique ou à partir de relations phénoménologiques.

c.2- Modèles de comportement

Un modèle de comportement du système se présente sous la forme d'une relation mathématique donnant une réponse temporelle en fonction de facteurs. Ceux-ci sont différents des paramètres dans le sens où ils n'ont pas de lien physique avec le phénomène étudié.

d- Classification selon le type de forme

Les modèles peuvent également être classifiés selon le type de forme comme la précise [17]. On peut trouver les formes suivantes : sémantiques, schémas physiques (schémas cinématiques, électriques, hydrauliques), schémas logiques ou graphiques (Bond Graph, REM, GIC, ...), équations mathématiques analytiques ou numériques mises sous différentes formes (équations différentielles, équations aux dérivées partielles, modèles d'état, matrices de transfert ...). D'autres formes sont également précisées dans [17].

Compte tenu des aspects de complexité des systèmes mécatroniques que nous avons précisés dans les paragraphes précédents, les outils de modélisation doivent présenter un certain nombre de caractéristiques afin de permettre une modélisation efficace de ces systèmes. Ces principales caractéristiques, en partie exposées dans [17], sont liées au langage de modélisation et à son logiciel d'utilisation.

C'est dans cette optique que nous visons à proposer de nouvelles approches en termes de méthodes et d'outils de la mécatronique en vue d'étudier et analyser des systèmes soumis à d'importants effets dynamiques, tels que les turbines éoliennes. Nous étudierons une démarche de modélisation pour l'étape de pré-dimensionnement de ce système mécatronique complexe. Cette étape a été choisie, car c'est, lors de cette étape, que l'architecture du système est déterminée et que les couplages souhaités ou non du système sont principalement modélisés. Celle-ci peut être présente aussi bien pour la reconception d'un appareil existant ou la recherche de systèmes innovants dans le cas d'un nouvel appareil. Les parties suivantes de ce chapitre permettent de présenter un bref état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne, et en conséquence de préciser le contexte et les objectifs de cette thèse.

1.5 Les turbines éoliennes et les activités de recherche

1.5.1 Introduction

L'énergie éolienne est une ressource d'origine solaire, provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre, par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement de l'autre. Environ 0,25% du rayonnement solaire total est converti en énergie éolienne [44], ce type d'énergie est dite *renouvelable*, c'est-à-dire non dégradée puisqu'elle dépend du soleil, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). L'énergie éolienne est devenue aujourd'hui une réalité. Elle est en plein développement en terme de puissance installée dans le monde. Plusieurs facteurs ont contribué et contribuent encore à son essor :

- L'énergie éolienne est propre : les éoliennes n'engendrent aucune pollution. Elle ne rejette aucune substance dangereuse dans l'environnement et n'engendre aucun déchet. L'utilisation d'une turbine de $1000kW$, dans des conditions normales, évite un rejet annuel de $2000tonnes$ de dioxyde de carbone émis par d'autres sources de production d'électricité, par exemple les centrales électriques à charbon.
- L'énergie éolienne est abondante : le vent est inépuisable, il constitue donc une véritable ressource renouvelable.
- L'énergie éolienne est prometteuse : l'énergie éolienne est actuellement la moins chère de toutes les énergies renouvelables existantes. Une étude faite en 2003 sur l'état de l'art de l'éolien montre que le coût à cette époque du kilowattheure (kWh) d'origine éolienne était de $3.79 cent euro$ [44, 45]. Le développement de l'éolien permettra de réduire encore ce coût.
- L'énergie éolienne est la source d'énergie renouvelable la plus fiable : une éolienne a un taux de disponibilité matérielle de plus de 98%.

1.5.2 Définition de la turbine éolienne

Le système éolien est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis en énergie électrique (Figure 1.6). Elles sont généralement utilisées pour produire de l'électricité et font partie de la catégorie des énergies renouvelables.

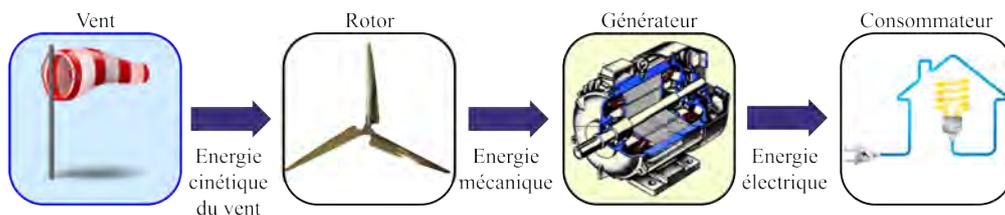


Figure 1.6: Conversion de l'énergie cinétique du vent.

1.5.3 Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles selon la configuration de leurs axes : vertical ou horizontal [46]:

a- Les éoliennes à axe horizontal

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait que leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal, car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent (Figure 1.7). Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales.



Figure 1.7: Éolienne à axe horizontal.

b- Les éoliennes à axe vertical

Pour ces capteurs d'énergie, l'axe de rotation est perpendiculaire à la direction du vent (Figure 1.8), et sont les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc elles sont facilement accessibles. Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation.



Figure 1.8: Éolienne à axe vertical.

Notre travail est consacré à l'étude des turbines éoliennes à axe horizontal.

1.5.4 Principe de fonctionnement des turbines éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique. [47]

1.5.5 Éléments constitutifs d'une turbine éolienne à axe horizontal

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor, cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou utilisée par des charges isolées. Une éolienne est constituée par (Figure 1.9) :

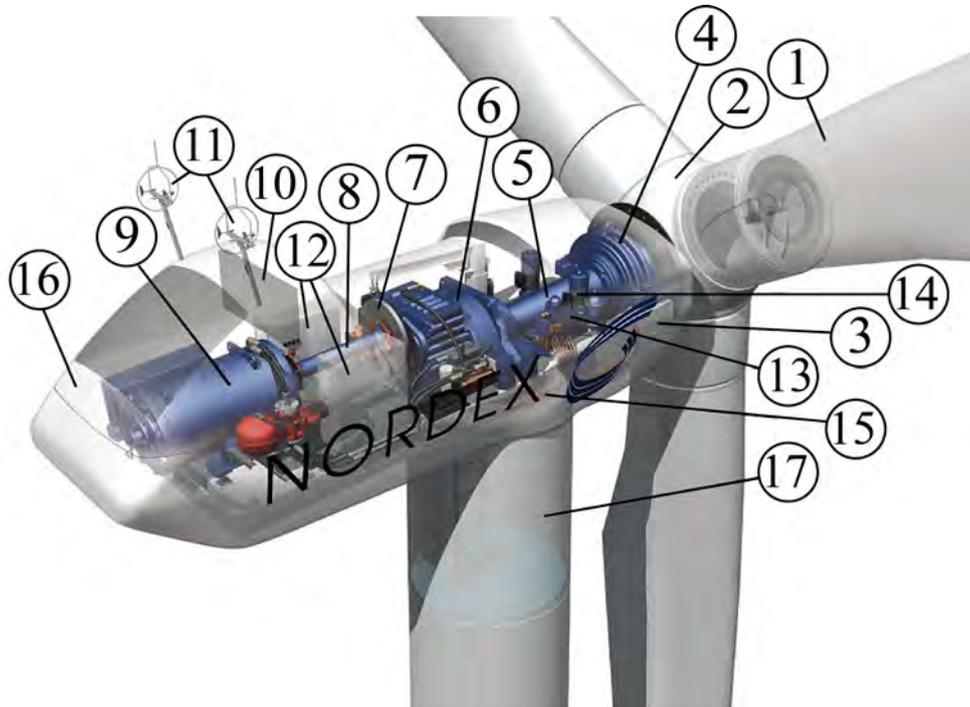


Figure 1.9: Les composantes de l'aérogénérateur.

1. Les pales : ce sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor
2. Le moyeu : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
3. Le cadre de la turbine fabriqué en fonte ductile.
4. Le roulement du rotor.
5. L'arbre primaire (ou arbre lent) : relie les pales au multiplicateur.
6. Le multiplicateur : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
7. Le disque de freinage.
8. L'arbre secondaire : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
9. Le générateur électrique : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
10. Le radiateur de refroidissement du générateur et du multiplicateur.
11. Les outils de mesure du vent : girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.

12. Le système de contrôle électronique : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.
13. Le système hydraulique qui assure le réglage de la pression hydraulique pour les systèmes de freinage.
14. Le système d'orientation de la nacelle : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
15. Le système de freinage de la nacelle.
16. La nacelle : une véritable salle des machines perchée en haut de la tour, la nacelle renferme tous les instruments qui permettent à l'éolienne de fonctionner automatiquement. L'ensemble peut peser entre 300 et 400 tonnes.
17. La tour : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente, mais en même temps le coût de la structure augmente. En général, le mat a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales.

1.5.6 Les technologies d'éoliennes

Il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, celles dont la vitesse est constante et celles dont la vitesse est variable. La partie suivante décrit d'une manière assez générale le fonctionnement de ces deux procédés.

a- Les éoliennes à vitesse fixe

a.1- Principe général

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau. Sa vitesse ω_{mec} est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice (Figure 1.10).

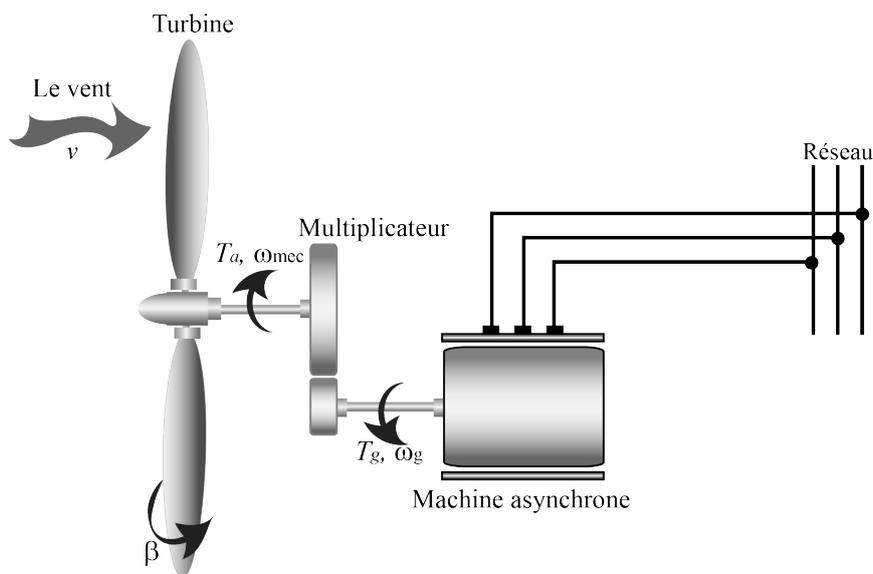


Figure 1.10: Éolienne directement connectée au réseau.

Le couple mécanique entraînant (produit par la turbine) tend à accélérer la vitesse de la génératrice. Cette dernière fonctionne alors en hyper-synchrone et génère de la puissance électrique sur le réseau. Pour une génératrice standard à deux paires de pôles, la vitesse mécanique (ω_{mec}) est légèrement supérieure à la vitesse du synchronisme $\omega_s = 1500tr/min$, ce qui nécessite l'adjonction d'un

multiplicateur pour adapter la génératrice à celle du rotor de l'éolienne [48] (Figure 1.11).

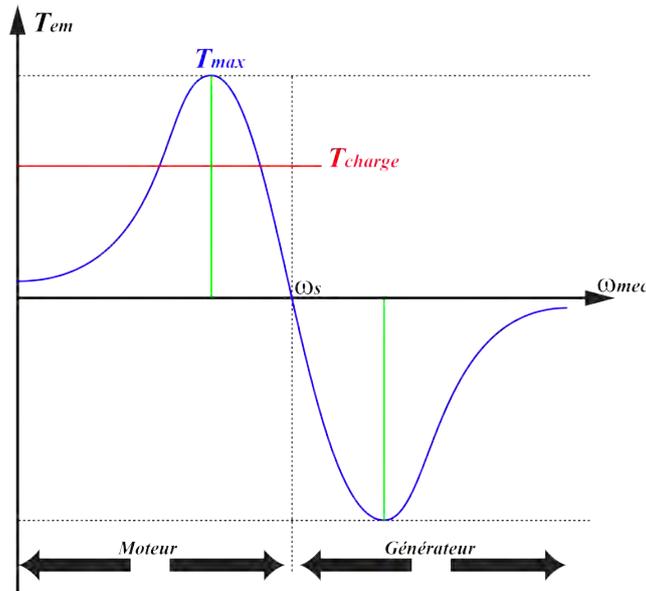


Figure 1.11: Caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone.

On peut distinguer deux technologies d'éoliennes à vitesse fixe : les éoliennes à décrochage aérodynamique et les éoliennes à pales orientables.

a.2- Les éoliennes à décrochage aérodynamique

Les éoliennes à décrochage aérodynamique (stall) génèrent une puissance électrique variable dont la valeur maximale correspond en général à la puissance nominale de la machine. En dessous de cette valeur, la puissance fournie croît avec la vitesse du vent. Au-delà, la puissance fournie décroît avec la vitesse du vent (Figure 1.12) [49].

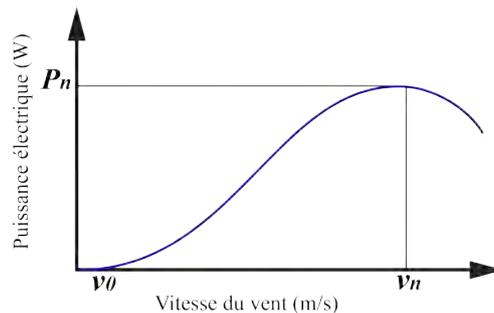


Figure 1.12: Génération à puissance électrique variable (pales fixes, décrochage aérodynamique).

On définit :

- P_n , la puissance nominale de l'éolienne.
- v_0 , la valeur de vitesse pour laquelle le rotor de la turbine commence à tourner.
- v_n , la valeur de vitesse pour laquelle la puissance nominale est atteinte.

Pour obtenir cette caractéristique de puissance, les pales (fixes) sont conçues avec un profil qui permet d'obtenir une décroissance brusque de la portance à partir d'une vitesse donnée pour laquelle la puissance doit être diminuée. Au-delà de cette vitesse de vent, la puissance diminue très rapidement et un fonctionnement à puissance nominale constante n'est donc pas possible.

Pour les machines de fortes puissances, on trouve également le système " Stall actif " [50]. Le décrochage aérodynamique est alors obtenu progressivement grâce à un dispositif permettant un débatement des pales contre le vent. L'orientation des pales étant très réduite, le dispositif mécanique est technologiquement plus simple et moins coûteux que le système à orientation des pales qui est maintenant présenté.

a.3- Les éoliennes à pales orientables

L'utilisation d'un système d'orientation des pales permet, par une modification aérodynamique, de maintenir constante la puissance de la machine en fonction de la vitesse du vent et pour une vitesse de vent supérieure à v_n (Figure 1.13) [51]. Ce dispositif de réglage sera plus amplement étudié par la suite.

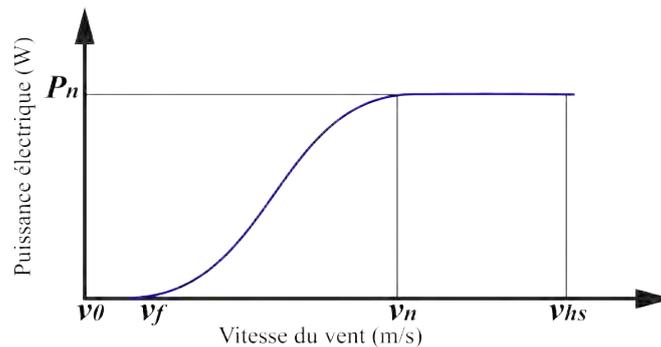


Figure 1.13: Génération à puissance électrique constante (pales orientables).

Avec

- v_f , la vitesse pour laquelle le générateur commence à fournir de la puissance.
- v_{hs} , la valeur de la vitesse pour laquelle la machine doit être arrêtée.

b- Les éoliennes à vitesse variable

b.1- Principe général

Les deux structures existantes des éoliennes à vitesse variable sont présentées sur les Figures 1.14 et 1.15. La configuration de la Figure 1.14 est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques.

La configuration de la Figure 1.15 est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné. La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique.

b.2- Intérêt de la vitesse variable

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la Figure 1.16.

Pour une vitesse de vent v_1 et une vitesse mécanique de la génératrice ω_1 , on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de v_1 à v_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la deuxième caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure ω_2 . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence (ω_{ref}) calculée pour maximiser la

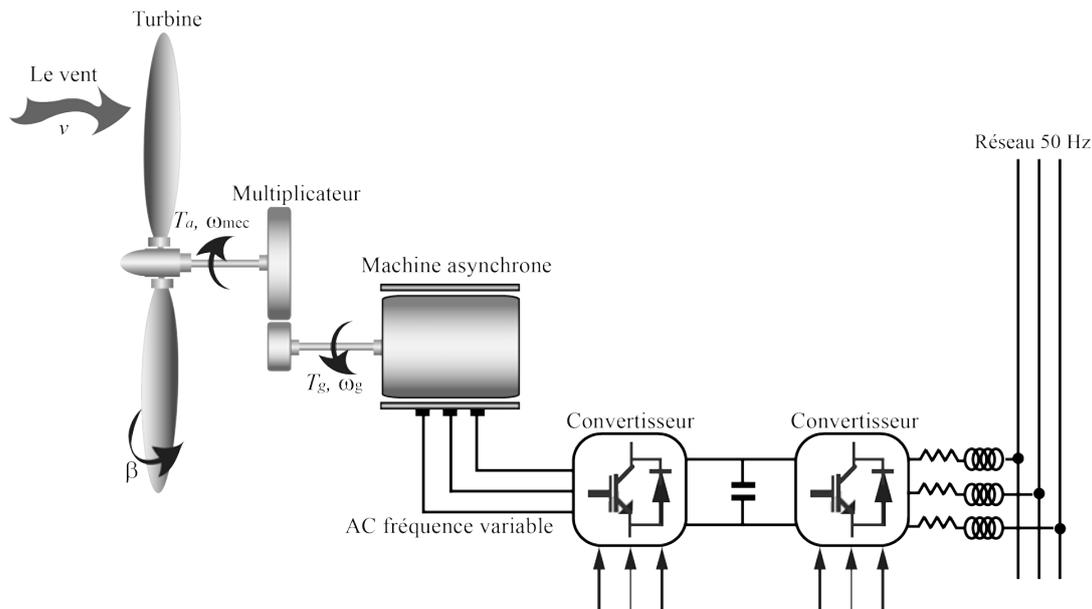


Figure 1.14: Éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à cage.

puissance extraite.

1.5.7 Objectif

Cette première analyse offre une aide à la compréhension globale du fonctionnement de la turbine éolienne. Les activités de recherche de cette thèse sont centrées sur la maîtrise dynamique de ce système multidisciplinaire complexe, nous considérons le sens mécanique de ce système. Par "maîtrise dynamique", nous entendons la mise en place de méthodes permettant de maîtriser des comportements non souhaités (instabilités ou vibrations) ou des comportements souhaités (production d'énergie électrique). La complexité de ce système peut alors être liée à plusieurs critères :

- La multiplicité de sous-systèmes en forte interaction, la connaissance et l'analyse de ces différents sous-systèmes étant généralement considérés sans les interactions ;
- L'aspect multi-physique du système, conduisant à la nécessité de compétences multidisciplinaires et le recours à des modélisations multiples ;
- La présence de comportements difficiles à appréhender tels que des non-linéarités, des frottements ou encore d'élasticité du système ;
- L'existence de plusieurs phases de fonctionnement du système (ceci est fonction de la vitesse du vent).

Afin de maîtriser les comportements dynamiques de la turbine éolienne, l'objectif principal de ce travail est de proposer des méthodes de modélisation énergétique, d'identification et de commande, principalement pour :

- Permettre de considérer le système dans sa globalité tout en accédant à des niveaux de modélisation plus détaillés ;
- Permettre l'analyse de phénomènes impliquant des échanges d'énergie entre sous-systèmes ;
- Faciliter les interconnexions entre modèles en conservant les liens d'énergie ;
- Faciliter la définition de structures de commande adaptées au système (et aux sous-systèmes) à partir des modèles obtenus.

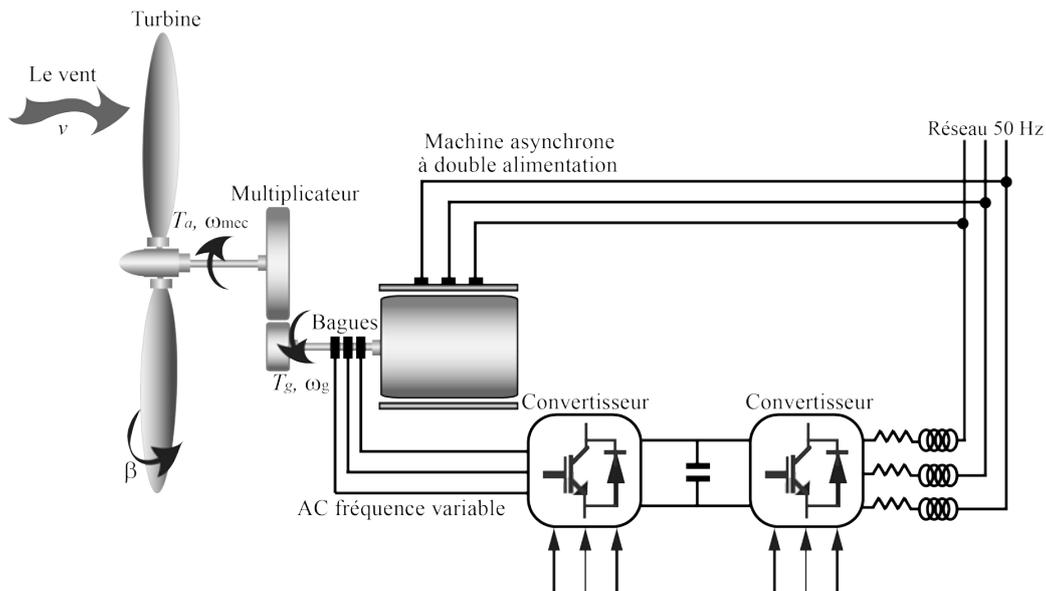


Figure 1.15: Éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à double alimentation.

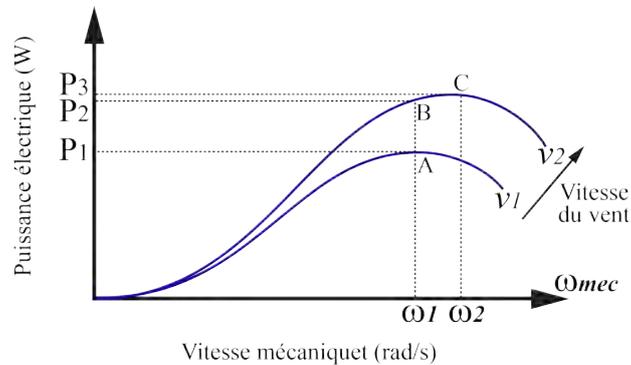


Figure 1.16: Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse de mécanique et la vitesse du vent.

Pour positionner les outils et méthodes utilisés pour ces travaux, il est nécessaire de faire un bilan des méthodes qui existent pour la modélisation et l'analyse des différents sous-systèmes de l'éolienne. Il s'agit d'une concaténation de différentes approches en fonction de la nature du sous-système considéré et de la précision requise pour un objectif d'étude. La modélisation des sous-systèmes de l'éolienne se fait en plusieurs étapes :

La première étape de modélisation est la détermination des équations du sous-système considéré à partir des lois fondamentales de la physique. Ensuite, la deuxième étape consiste en la résolution numérique de ces équations pour la simulation. Lors des deux étapes de modélisation, on distingue trois types d'approches qui sont utilisés selon l'objectif d'étude.

- Les approches numériques pour traiter les structures déformables comme la tour et les pales (modèles à éléments finis mécaniques) et pour traiter les interactions fluide-structure.
- Les approches analytiques pour l'analyse du comportement dynamique des différents sous-systèmes (électriques : générateur, électronique de puissance ; mécaniques multi-corps : rotors, dispositif d'entraînement) et définir les structures de commande si nécessaire.
- Les approches empiriques et semi-empiriques basées sur l'expérimentation pouvant être utilisée à différentes étapes de la modélisation. Les approches semi-empiriques consistent à ajouter des paramètres empiriques qui permettent le recalage entre la théorie et l'expérimentation.

Pour la deuxième étape, plusieurs logiciels peuvent être utilisés. Il existe des logiciels "universels", utilisés pour plusieurs domaines d'application de la physique tels que Catia, Matlab, Mathematica, 20-Sim. Et des logiciels spécifiques à l'éolienne sont développés avec une approche consistant à intégrer un maximum de fonctions de simulation (approche par intégration). Les logiciels spécifiques à l'éolienne les plus connus sont S4WT, WindPro et WindFarmer.

Dans ces travaux de thèse, nous nous intéressons aux approches de modélisation analytique. À ce niveau, nous remarquons que, les méthodes classiques de modélisation des sous-systèmes (modèle de la turbine et chaîne de commande) se fait séparément et que la connaissance des interactions entre ces éléments est insuffisante pour permettre l'analyse et la compréhension de phénomènes impliquant des couplages énergétiques entre sous-systèmes. Tout ceci, exige la nécessité d'avoir une approche de modélisation globale du système.

Pour conclure, peu ou pas d'approches énergétiques, multiphysiques et globales ont été utilisées ou développées pour la modélisation et la commande des éoliennes. C'est dans cette perspective de développement de modèles d'éoliennes, complémentaires à ceux existantes, que s'inscrivent ces travaux de thèse : des modélisations qui permettent de supporter des activités de conception d'analyse et de contrôle, et pour étudier le potentiel des outils de représentations graphiques en application aux éoliennes en réponse aux besoins suivants :

- apporter un aspect méthodologique pour la modélisation de ce type de système ;
- analyser leur potentialité pour comprendre et maîtriser les phénomènes d'instabilité engendrés par des couplages mal maîtrisés entre sous-systèmes ;
- étudier la potentialité de la méthode pour l'amélioration des systèmes de commande.

Afin de répondre à ces objectifs, une partie importante des travaux est consacrée à une recherche bibliographique sur les différents outils de représentation multiphysique existants, pour étudier ceux qui correspondent le mieux à nos objectifs. Une autre partie est consacrée à l'application des outils retenus pour la proposition de la représentation multiniveaux.

1.5.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les objectifs principaux de cette thèse, après avoir défini et caractérisé les systèmes mécatroniques, qui sont centrés sur la modélisation et la commande des turbines éoliennes de point de vue mécatronique.

Dans ce cadre, notre intérêt s'est porté sur la complexité du système liée à la multiplicité de sous-systèmes en fortes interactions ainsi qu'à la superposition de différents comportements physiques. La multiplicité des sous-systèmes dans l'éolienne implique généralement l'emploi de plusieurs types de modélisation. La combinaison de ces modèles complique l'analyse du système dans sa globalité. Le besoin d'une approche de modélisation qui soit la plus globale possible nécessite une réflexion sur les outils de représentation multiphysique, qui sera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE

2

Les outils de modélisation des systèmes mécatroniques

2.1 Introduction

Après avoir défini la notion de systèmes mécatroniques et de systèmes complexes, les questions naturelles qui se posent alors sont les suivantes : Quels sont les outils adéquats pour la modélisation de tels systèmes, pour quelles raisons le sont-ils et comment peuvent-ils être utilisés ?

Dans la première partie de ce chapitre, un aperçu des principaux outils de modélisation multiphysique existants est présenté. Dans ce contexte et par rapport aux objectifs présentés dans le chapitre précédent, nous verrons pour quelles raisons le Bond Graph a été retenu pour la modélisation du système étudié. Les intérêts de cet outil par rapport à d'autres outils, souvent plus classiques, seront également exposés.

Dans la deuxième partie du chapitre, la méthode générale de modélisation des systèmes multiphysique, utilisée dans cette thèse, à partir du Bond Graph, sera détaillée.

2.2 Aperçu des outils de modélisation

Il existe fondamentalement deux approches de modélisation dans la phase de pré-dimensionnement des systèmes mécatroniques : approche de modélisation fonctionnelle et approche de modélisation structurelle. Cette partie a pour objectif de décrire les outils de modélisation de chacune de ces approches afin de choisir un outil permettant de répondre le mieux possible à nos objectifs.

2.2.1 Approche de modélisation fonctionnelle

L'approche de modélisation fonctionnelle se caractérise par le fait que les modèles sont constitués par une association de fonctions mathématiques [40]. Avec ce type d'outils, l'architecture du système n'apparaît plus de façon explicite. Ces modèles représentent la manière dont les étapes de calculs sont effectuées. Les principaux outils de modélisation fonctionnels sont décrits dans ce qui suit.

a- Mise en équations

La plus ancienne technique de modélisation est celle qui consiste à traduire le comportement d'un système à l'aide d'un modèle mathématique sous la forme d'équations à résoudre. La résolution peut alors être effectuée de manière analytique ou numérique. Une résolution analytique est effectuée à l'aide

de fonctions mathématiques qui conduisent à une ou plusieurs formules explicites permettant d'obtenir la solution. Lorsqu'elles sont possibles, les méthodes analytiques sont privilégiées, car elles sont exactes et permettent l'analyse de l'influence des différents paramètres intervenant sur le résultat [52]. La résolution numérique est utilisée lorsqu'il n'existe pas de développement analytique possible ou lorsque le nombre d'équations est trop grand [35]. Elle permet à l'aide d'un ensemble d'algorithmes d'obtenir une solution numérique d'un problème avec une précision désirée après un nombre d'opérations arithmétiques. C'est pourquoi il est généralement recherché d'éviter ou de retarder le plus tard possible la résolution numérique. Lorsque seule une résolution numérique est possible, il est cependant intéressant de préserver une phase de calcul analytique avant la résolution numérique. Cela permet une utilisation combinée analytique/numérique où chaque outil de calcul est utilisé dans son domaine avec une grande efficacité comme il est précisé dans [53].

A l'heure actuelle, les outils classiques utilisés pour la manipulation et la résolution analytique d'équations sont les logiciels dits formels ou symboliques. Dans [54], un certain nombre d'avantages du calcul formel est mentionné. A titre d'exemples, on peut citer Maple ou Mathematica. Pour la résolution numérique, de nombreux logiciels existent. À titre d'exemple, on peut citer les langages de programmation comme C++ ou les logiciels de calculs scientifiques comme Matlab ou Scilab.

b- Fonctions de transfert

Les fonctions de transfert sont largement utilisées dans le cadre des études de systèmes asservis aussi bien purement analogiques, numériques ou encore hybrides. Cette représentation se fait à partir de la connaissance des équations différentielles entre une entrée et une sortie du système étudié, grâce à l'utilisation de la transformée de Laplace (variable p ou s) et de sa discrétisation (variable z) dans le cas des systèmes numériques ou hybrides. Il est également possible de pouvoir déterminer la fonction de transfert expérimentale d'un système par l'utilisation, par exemple, d'un Dirac sur l'entrée et la transformée de Fourier de la sortie. Les fonctions de transfert sont bien adaptées aux systèmes linéaires, mais sont relativement dépourvues face à des systèmes non linéaires. Il existe cependant des techniques permettant de traiter certaines non-linéarités afin de revenir à un système classique. Un avantage des fonctions de transfert est la bonne maîtrise des correcteurs, aussi bien numériques qu'analogiques (PID, RST, Zdan, prédicteurs de Smith, ...), qui permettent une mise en œuvre rapide de systèmes asservis (fonctionnement en boucle fermée). L'inconvénient de cette modélisation peut être sa causalité ainsi qu'un éventuel besoin de recalculer les fonctions de transfert des correcteurs dès l'ajout ou la modification d'une fonction dans la boucle ouverte.

c- Représentation d'état

La représentation d'état est une écriture matricielle d'un système d'équations différentielles. L'intérêt de cette écriture se présente lorsque ce système d'équations différentielles est linéaire et invariant. Le système étudié peut être aussi bien continu (forme analogique) que discret (forme numérique) voire hybride. Le système d'équations est alors réécrit de manière à obtenir des vecteurs de variables d'état, de mesure et de commande ainsi que des matrices dites, dynamique (A), commande (B), observation (C) et d'action directe (D), comme indiquée dans l'équation suivante (Équation 5.29):

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + Bu \\ Y = CX + Du \end{cases} \quad (2.1)$$

Une fois ces matrices déterminées, il est possible de déterminer la commandabilité et l'observabilité du système, et si ces hypothèses sont vérifiées un correcteur de placement de pôles par retour d'état est directement calculable afin de stabiliser le système en boucle fermée. L'avantage de cette représentation est qu'il n'existe pas de représentation unique d'un système et est donc adaptable par le concepteur du modèle à ses besoins. Cependant, cette modélisation se fait sous forme d'entrée/sorties fixée et est donc causale.

d- Les schémas-blocs

La modélisation par schémas-bloc est connue depuis les débuts de l'automatique. Aussi, seules leurs caractéristiques essentielles seront donc rappelées. Les schémas-blocs représentent des relations fonctionnelles entre des entrées et des sorties. La modélisation par schémas bloc est dit informationnel (ou encore de type signal) dans la mesure où les liens entre les blocs ne fournissent qu'une seule information et en aucun cas les transferts d'énergie comme le Bond Graph qui sera décrit dans la suite de ce chapitre. Les modèles fonctionnels peuvent être hiérarchisés [40]. La décomposition de ces modèles est alors réalisée de manière fonctionnelle c'est-à-dire qu'une fonction peut être décomposée en sous-fonctions.

2.2.2 Approche de modélisation structurelle

Durant les vingt dernières années, de nouveaux outils de modélisation dits « structurels » par comparaison aux outils plus anciens dits « fonctionnels » sont apparus. Ce nouveau type d'outil se caractérise par le fait que ces outils permettent de produire des modèles structurels comme nous l'avons défini dans le chapitre précédent. Pour mémoire, les modèles structurels sont construits selon la structure physique du système ou encore la façon dont les éléments d'un système mécatronique réel sont assemblés. Pour appréhender cette notion, les modèles structurels peuvent en quelque sorte se superposer aux schémas physiques (schémas cinématiques, schémas électriques, etc.) utilisés en début de la modélisation pour représenter de manière simplifiée la topologie du système [40]. Pour ce type de modèles, les liaisons entre les éléments définis sur un schéma cinématique permettent de guider leur construction.

Afin de présenter les principales différences de chaque formalisme, nous avons choisi d'étudier un système électromécanique relativement simple [55] (Figure 2.1). Ce système est composé d'une alimentation continue (supposé parfaite), d'une machine à courant continu à excitation séparée, de deux convertisseurs continu-continu (hacheurs avec pertes négligées) pour adapter les étages de tension, d'une inductance de lissage (nécessaire dans cette certaine application à fréquence de découpage faible), d'un arbre mécanique, d'une charge quelconque et d'un frein mécanique (agissant directement sur l'arbre). Pour plus des détails sur cet exemple voir [55].

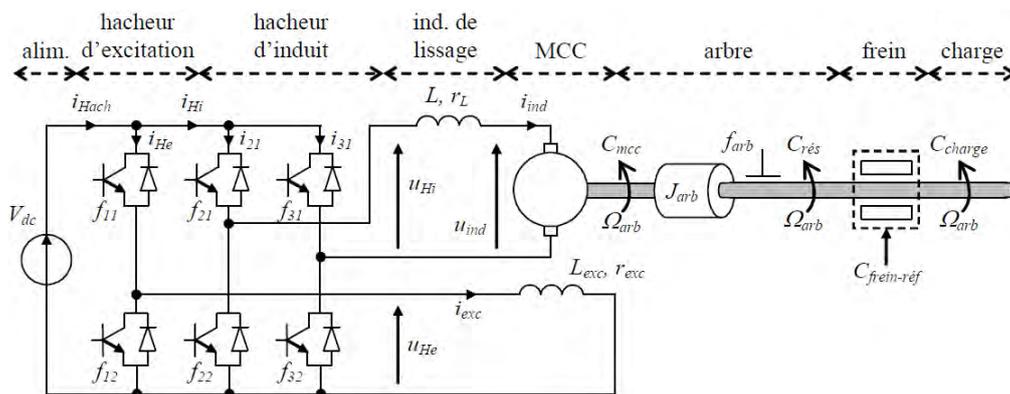


Figure 2.1: Exemple du système électromécanique.

a- Bond Graph

Le Bond Graph que l'on peut traduire par « graphe à liens » ou « graphe de liaisons » a été créé il y a un peu plus d'un demi-siècle. En avril 1955, le « père fondateur » des Bond Graphs, Henry M. Paynter du MIT de Boston (États unis), fit sa première conférence sur les Bond Graphs. Six ans plus tard, il publia son premier ouvrage [56]. Le Bond Graph fût formalisé par la suite dans les années 1970 par deux de ces doctorants, Dean C. Karnopp [57] et Ronald C. Rosenberg [58], et par Jean U. Thoma [59]. Vers la fin des années 1970, le Bond Graph arriva au Pays Bas à l'université de Twente

et en France dans la société Alstom.

Le Bond Graph est fondé sur une étude des transferts d'énergie au sein d'un système modélisé par des paramètres localisés. Le Bond Graph est un outil graphique de modélisation qui concerne tous les systèmes physiques (électroniques, mécaniques, hydrauliques, thermiques ...) quelle que soit la classe du système d'équations qu'il représente (linéaire, non linéaire, continu, discret, échantillonné). Il se représente comme un graphe orienté faisant apparaître des variables dynamiques et les liens de puissance entre ces variables. Le Bond Graph associe systématiquement deux variables de nature différente à chaque lien (appelé « Bond » en anglais) du graphe : une variable dite variable généralisée d'effort, et une variable dite variable généralisée de flux, située du côté de la demi-flèche du lien. Chaque lien porte donc une information de puissance, obtenue par le produit de ces deux variables, et permet un accès direct à l'énergie transférée, par simple intégration de la puissance. Les éléments de base du Bond Graph sont :

- Trois éléments dits passifs (R, I, C) transforment la puissance qui leur est fournie en dissipant l'énergie ou en stockant l'énergie.
- Deux éléments actifs (Se, Sf) fournissent la puissance au système (sources d'effort ou de flux).
- Quatre éléments de jonction (0, 1, TF, GY) conservent la puissance et servent à coupler les divers éléments actifs et passifs.

Les principaux intérêts du Bond Graph viennent, d'une part, du fait que le Bond Graph est un langage qui permet de satisfaire les contraintes de conception liées à la modélisation des systèmes mécatroniques (présenté dans le chapitre 1) et d'autre part, il permet aussi des analyses supplémentaires : par exemple, des flux énergétiques, des phénomènes physiques, des propriétés du système (causalité, commandabilité, observabilité, inversibilité, etc), la commande du système.

Nous allons maintenant présenter en quoi ce langage est particulièrement adapté à la modélisation des systèmes mécatroniques. Le Bond Graph semble répondre parfaitement au besoin d'un outil modulaire qui soit hiérarchisé, flexible et suffisamment réutilisable.

Tout d'abord, il permet une approche hiérarchisée (encore appelée multi-niveaux). Le concepteur peut décomposer son modèle en plusieurs sous-modèles grâce à la notion de modèles Bond Graph à Mots (BGM ou WBG Word Bond Graph en anglais). Cela permet à l'utilisateur d'avoir la possibilité de « zoomer/dézoomer » sur différentes parties du système. Ensuite, le Bond Graph présente une certaine modularité au niveau du modèle du système. L'ajout ou la modification de nouveaux éléments ou sous-systèmes construits séparément et le remplacement de lois de comportement linéaires en lois non linéaires plus réalistes facilitent la gestion des interactions et le changement de lois de comportements. Enfin, le Bond Graph aborde la modélisation de manière acausale en permettant de se focaliser d'abord sur la description physique des phénomènes impliqués au sein du système, indépendamment de l'utilisation qui sera faite du modèle. Le modèle reste inchangé suivant les entrées auxquelles il est soumis. Par ailleurs, le Bond Graph se présente sous une représentation graphique identique quel que soit le domaine physique abordé et il permet donc de répondre à l'aspect « multi-physique » que revêt la modélisation des systèmes mécatroniques. Cette approche unifiée permet, de plus, de faciliter par la même occasion les analogies entre différents domaines de la physique.

La simulation de modèles Bond Graph est possible directement à l'aide de logiciel 20-sim. Pour ce faire, l'utilisateur peut directement saisir un modèle Bond Graph à l'aide d'une interface graphique. La simulation numérique d'un modèle Bond Graph est alors réalisable. La mise en équation et sa résolution sont réalisées de manière automatique par le logiciel et l'utilisateur n'a ainsi pas besoin d'écrire et de résoudre d'équations. Cet aspect est très pratique pour analyser le comportement d'un système suite à une modification d'hypothèses (rajout de raideurs ou amortissements, changements d'une loi de comportement). En plus de présenter les caractéristiques nécessaires d'un outil de modélisation pour

l'étude des systèmes mécatroniques, le langage Bond Graph permet aussi des analyses supplémentaires. En d'autres termes, comme il est mentionné dans [60, 61], le Bond Graph n'est pas seulement un outil de modélisation destiné à réaliser un modèle de connaissance pour faire de la simulation. Il est aussi un outil d'analyse et d'aide à la conception. Le langage Bond Graph est maintenant utilisé pour d'autres aspects que la modélisation et la simulation comme notamment :

- L'inversion de modèles pour le dimensionnement [17],
- La détermination de structures de commande [62],
- L'identification des paramètres,
- La réduction de modèles [63],
- L'étude de la sensibilité aux incertitudes paramétriques [64],
- Ainsi que d'autres activités citées dans [17] où se trouvent des références relatives à la reconception, la synthèse paramétrique et la sûreté de fonctionnement.

Ces intérêts seront aussi présents au niveau de l'outil Multi-Bond Graph dans la mesure où le Multi-Bond Graph est une extension de l'outil Bond Graph. Ce dernier sera particulièrement intéressant pour l'étude de la dynamique des solides multi-corps.

La modélisation par Bond Graph du cas d'étude (Figure 2.1) est représentée sur la Figure 2.2 (pour plus des détails sur cet exemple, voir [55]).

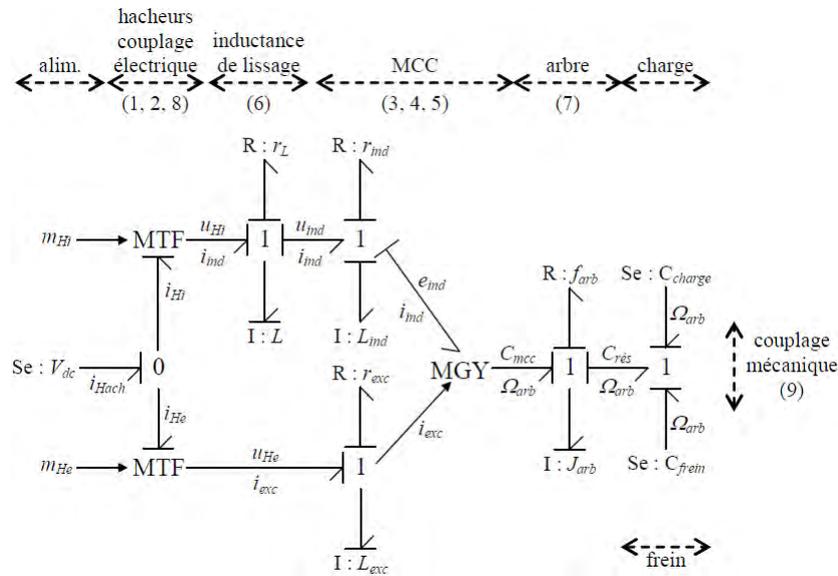


Figure 2.2: Bond Graph de l'exemple du système électromécanique.

b- Power-Oriented Graphs (POG)

Le POG que l'on peut traduire par « graphes orientés de puissance » a été développé à l'université de Modène et de Reggio d'Émilie (Italie). Il est caractérisé par deux types d'éléments qui se représentent par fonction de transfert : le bloc d'élaboration (qui stocke et/ou dissipe l'énergie) et le bloc de connexion (qui transforme l'énergie). Le nombre limité d'éléments du formalisme (Annexe A) permet un apprentissage très aisé [65].

Cet outil est surtout utilisé pour apporter une aide à la simulation de systèmes complexes dans les domaines hydraulique [66], mécanique [67] et électrique [68]. Aucune méthode permettant de concevoir

l'architecture de commande n'a été développée à ce jour en association avec le POG. Le formalisme POG a été appliqué à l'exemple d'étude précédent (Figure 2.3) (pour plus des détails sur cet exemple voir [55]).

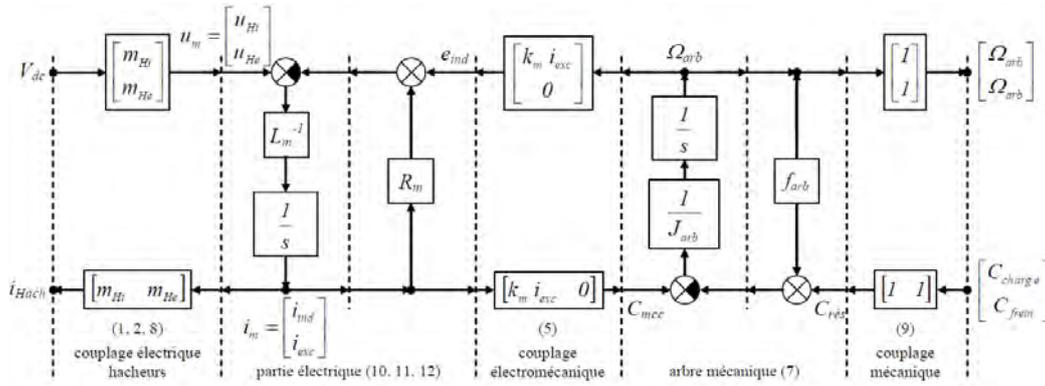


Figure 2.3: POG de l'exemple du système électromécanique.

c- Power Flow Diagram (PFD)

Le PFD que l'on peut traduire par « diagramme de flux de puissance » a été développé à l'université technique de Dresde (Allemagne) [69]. Ce formalisme permet de mettre en lumière les flux de puissance et le rendement énergétique des systèmes [70]. Les liens du Bond Graph sont décomposés en variables de flux et d'effort (variables de puissances généralisées), permettant ainsi d'avoir une représentation plus synthétique. Le PFD conserve la structure physique du système (en utilisant toutefois la notion de causalité intégrale) par une description graphique des flux d'énergie avec sommateurs apparents (Annexe A). Cet outil a pour application essentielle des entraînements électriques [70]. Le PFD a été appliqué à notre exemple (Figure 2.4)(pour plus des détails sur cet exemple voir [55]).

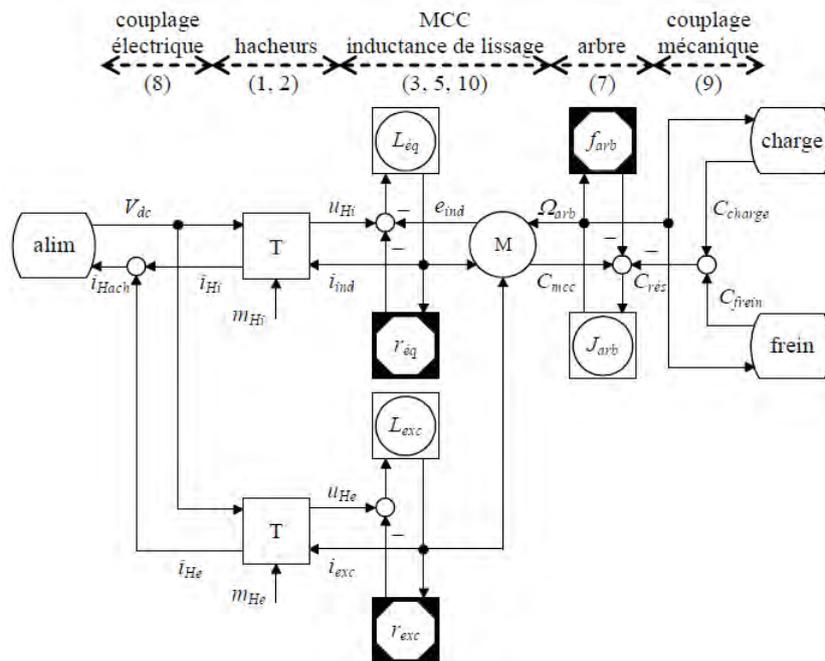


Figure 2.4: PFD de l'exemple du système électromécanique.

d- Puzzles énergétiques

Les puzzles énergétiques ont été développés au Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique Industrielle (LEEI) de Toulouse (France) [71]. Cet outil a été initialement développé pour concevoir (à partir d'un cahier des charges) des structures de conversion d'énergie utilisée dans le domaine du génie électrique [72]. Les éléments de celui-ci se représentent par des puzzles dont les excroissances correspondent aux variables de flux et d'effort (Annexe A). Une nouvelle fois, on constate une réelle différence avec le Bond Graph par une différenciation volontaire des variables de puissances généralisées.

Ce formalisme est pour l'instant restreint à l'électronique de puissance. Néanmoins, grâce à l'emploi des variables généralisées, cet outil pourrait être étendu à d'autres domaines physiques. On dénombre d'ailleurs quelques extensions électromécaniques [72]. Aucune méthode permettant de concevoir l'architecture de commande n'a été développée en association avec les puzzles énergétiques. Les puzzles énergétiques ont été appliqués au système électromécanique de notre exemple (Figure 2.5) (pour plus des détails sur cet exemple voir [55]).

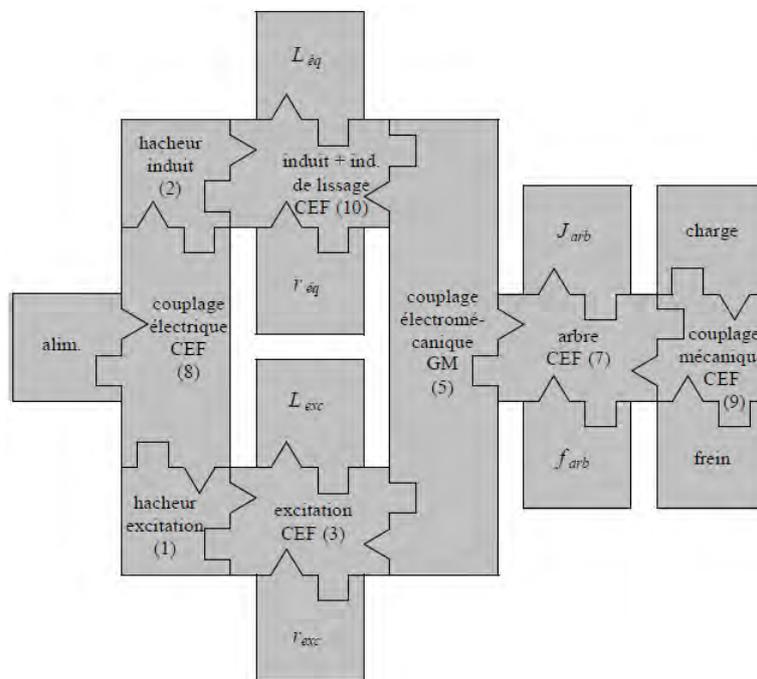


Figure 2.5: Puzzles énergétiques de l'exemple du système électromécanique.

Chacun de ces formalismes met en évidence certaines propriétés physiques des systèmes, mais ils présentent tous des caractéristiques similaires au Bond Graph et restent limités par rapport à ce dernier, notamment du point de vue logiciel de simulation. De plus, aucune méthode permettant de concevoir l'architecture de commande n'a été développée en association avec ces formalismes. Ces outils (POG, PFD et Puzzles Énergétique) ne seront pas retenus, car l'objectif global des travaux consiste à apporter une meilleure compréhension du comportement dynamique du système, mais aussi de meilleures solutions de conception de commande.

e- Graphe Informationnel Causal (GIC)

Le Graphe Informationnel Causal (GIC) est issu de travaux communs dans les années 1990 entre Jean Faucher du Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique Industrielle (LEEI) de Toulouse et Jean-Paul Hautier du Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance (L2EP) de Lille. Ce formalisme a pour objectif de modéliser exclusivement un système avec des causalités intégrales. L'outil a été développé et affiné par le L2EP afin d'en déduire une méthodologie systématique de commande [73].

Le GIC vise à connecter des éléments d'un système dont on possède la connaissance fonctionnelle. La notion d'information du GIC provient de l'absence d'affichage des relations entre variables sur le graphe. Cela permet d'obtenir une vision d'ensemble du système plus synthétique. Les entrées et sorties de chacune des composantes sont définies selon leur propre causalité naturelle ou physique (intégrale) [74].

La construction est établie sur deux éléments basiques (Annexe A), une relation causale (sortie fonction intégrale de l'entrée et donc dépendante du temps) et une relation rigide (sortie indépendante du temps). Soulignons le fait que ces éléments ne sont pas limités aux relations linéaires continues.

Les variables à puissances généralisées (scalaires ou vectorielles) sont de nature potentielle (équivalentes aux efforts en Bond Graph) ou cinétique (équivalentes aux flux). La description locale des divers composants du système et l'analyse des relations de cause à effet qui en découlent permettent de déduire une structure systématique de commande [75]. C'est l'une des principales forces du GIC.

Le GIC permet de réaliser (à partir d'un cahier des charges) une commande locale à partir du graphe de modélisation obtenu selon le principe d'inversion : toute commande d'un processus est issue de l'inversion de son modèle [73].

Le modèle GIC de l'exemple de la machine à courant continu à excitation séparée et sa commande est présenté sur la Figure 2.6 (pour plus des détails sur cet exemple voir [55]).

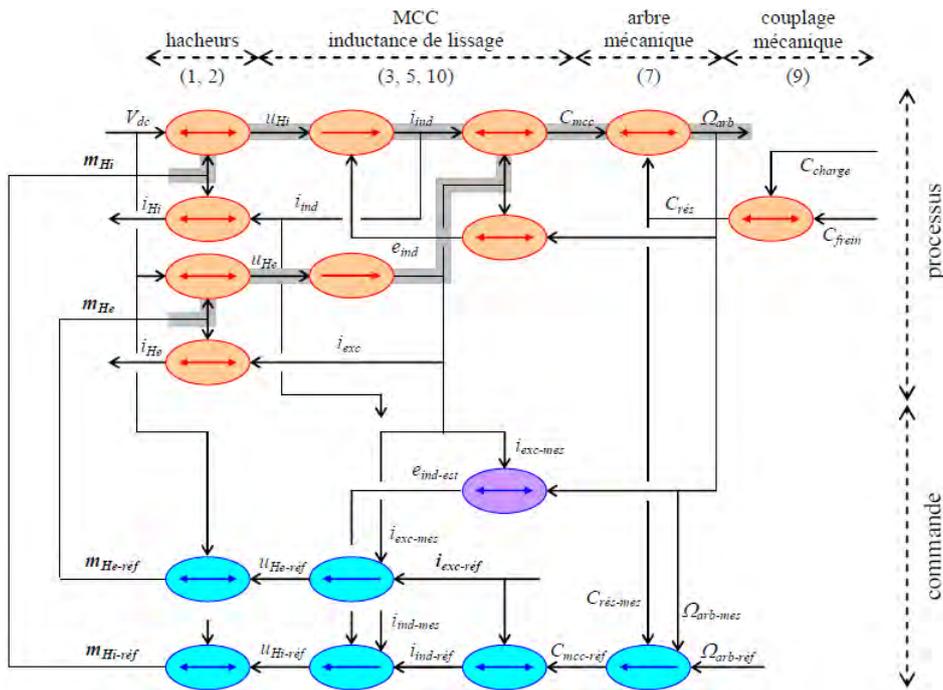


Figure 2.6: GIC de l'exemple du système électromécanique.

f- Représentation Énergétique Macroscopique (REM)

Cet outil a été développé sur la base du GIC, suivant le même principe de représentation causale. La REM permet d'organiser les éléments du système de façon à faire apparaître explicitement les transferts de puissance en réunissant les variables de flux et d'effort à la manière du Bond Graph, tout en imposant le respect de la causalité intégrale naturelle, à la manière du GIC, pour faciliter la structuration de la commande par inversion [76].

Pour mettre en relief les divers couplages (électriques, magnétiques, mécaniques) et les phénomènes non-linéaire (jeux mécaniques, contact roue-sol) du système. La REM est également utilisée pour la structuration de commande de divers autres systèmes : dans le domaine de l'automobile et plus particulièrement des véhicules électriques et hybrides [78, 79], dans le domaine des énergies renouvelables pour la gestion et la commande d'éoliennes [80, 81], de panneaux photovoltaïques ou encore de piles à combustible [82]. Toutefois, elle n'a jamais été appliquée à l'éolienne. Le point commun principal qui ressort de ces différents travaux consiste en l'exploitation de techniques d'inversion de modèles causaux pour la structuration de la commande.

La REM est présentée comme un outil permettant une organisation des modèles causaux (Annexe A), dans le cas de systèmes assez complexes, pour la structuration de commande. Cet outil n'est pas le plus adapté pour une application à l'éolienne, car il n'a pas été conçu pour la représentation des systèmes multicorps. Cependant, cet outil pourra être utilisé pour la définition de structures de commande de certains sous-systèmes de l'éolienne.

La REM du système électromécanique étudié est présentée sur la Figure 2.7 (pour plus des détails sur cet exemple voir [55]).

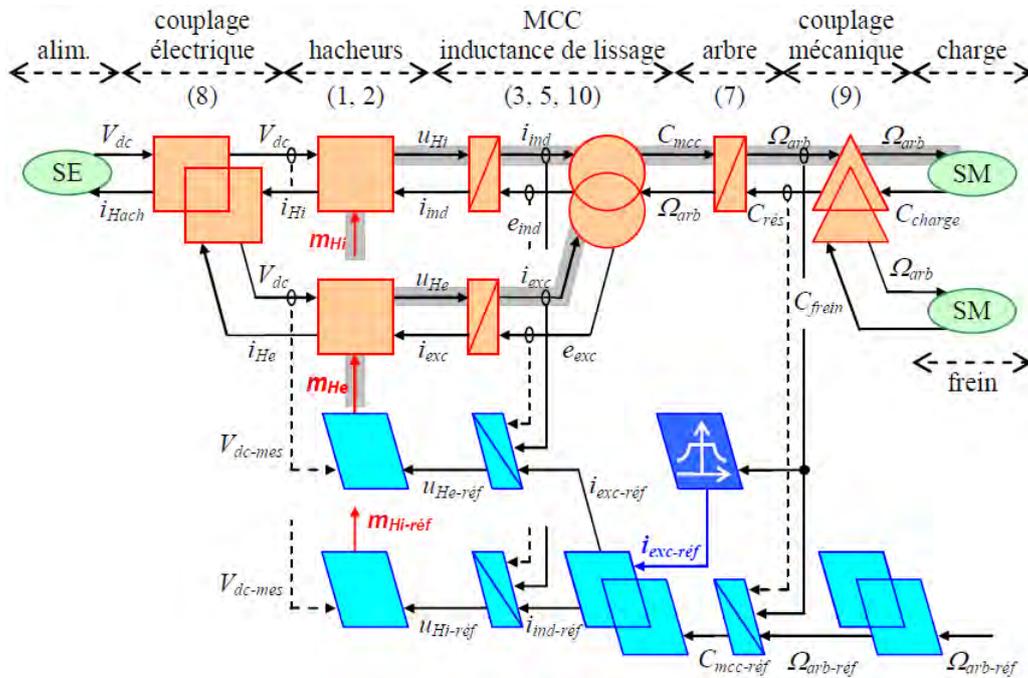


Figure 2.7: REM de l'exemple du système électromécanique.

2.2.3 Conclusion sur le choix de l'outil de modélisation

L'objectif global de ces travaux consiste à proposer une représentation énergétique et multiniveaux, prenant en compte les interactions entre les divers sous-systèmes, et ce, pour la maîtrise du comportement dynamique de l'éolienne.

Pour cela, et à partir de cette étude effectuée sur ces outils de modélisation, les outils de modélisation structurels nous semblent les plus pertinents pour la modélisation de systèmes mécatroniques complexes comme la turbine éolienne. En effet, ils permettent une approche de modélisation modulaire d'un système permettant d'aboutir à un modèle structurel. Le modèle du système global peut, en effet, être construit à partir des modèles des sous-systèmes construits séparément permettant une meilleure gestion des interactions et/ou des couplages.

Parmi ces outils de modélisation structurels, l'outil qui a été sélectionné est le Bond Graph. Ce formalisme présente les aspects de modularité que nous avons définis au chapitre 1 tout en permettant la modélisation de systèmes de différents domaines de la physique à l'aide d'un même modèle. Mais, le Bond Graph permet, en plus, de mener d'autres analyses notamment : l'analyse énergétique, l'analyse des propriétés structurelles du système et la conception de la loi de commande.

2.3 Le Langage Bond Graph

Le langage Bond Graph est un langage de modélisation permettant d'identifier les différents phénomènes physiques intervenant au sein d'un système et de représenter graphiquement leur interconnexion. Globalement, il permet de mieux appréhender la répartition des échanges d'énergie au sein d'un système. L'objectif de cette partie est, d'abord, de présenter les principes de base du langage bond graph. Pour ce faire, les notions de base seront rappelées. La procédure de construction d'un modèle simple et le principe de causalité seront ensuite décrits. Les livres de référence suivants [26, 61, 83, 40, 57] pourront permettre, au lecteur intéressé, d'approfondir ses connaissances dans le domaine du Bond Graph. L'exemple d'application donnée correspond à la commande d'une masse sur un axe d'une machine à commande numérique.

On considère deux systèmes S_1 et S_2 qui échangent de la puissance. Par exemple ces deux systèmes peuvent être représentés respectivement, par un moteur à courant continu et une charge, comme indiqué sur la Figure 2.8(a). Cette puissance échangée est représentée par un lien de puissance, caractérisé par une demi-flèche qui correspond au « bond » (ou lien) du Bond Graph (Figure 2.8(b)). L'expression de la puissance échangée entre les deux systèmes s'obtient par multiplication des deux variables dites « variables de puissance » appelée de manière générique « effort » et « flux » et notées respectivement f et e . Pour traduire le caractère générique des appellations « effort » et « flux », ces variables sont aussi appelées « variables généralisées ». L'effort est la variable intensive (par exemple : la force mécanique, le couple, la pression, le potentiel électrique, la température, le potentiel chimique, etc.) et le flux est la dérivée d'une variable extensive (par exemple : la vitesse, le débit volumique, le courant, la variation de l'entropie, etc.). Pour la représentation des variables, la variable d'effort peut être placée sur un côté du bond et la variable de flux peut être placée sur l'autre côté, bien que ces emplacements ne sont pas nécessaires dans de nombreux cas. L'expression de l'énergie est obtenue alors par intégration de l'expression de la puissance. Deux autres variables généralisées sont alors définies : les « variables d'énergie ». Elles sont définies comme l'intégrale par rapport au temps des variables de puissance. Celles-ci sont appelées « moment généralisé » et « déplacement généralisé » et noté respectivement p et q .

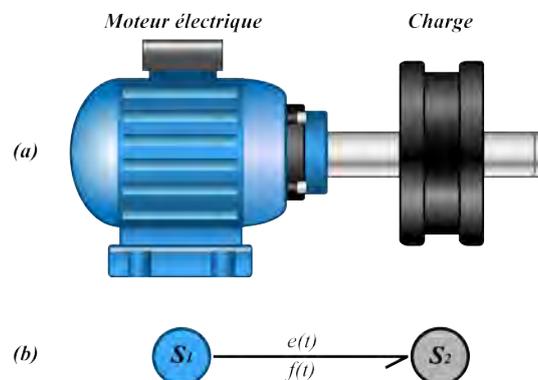


Figure 2.8: Transfert de puissance entre un moteur électrique et une charge (a), Représentation d'un lien de puissance bond graph (b).

Le Tableau 2.1 présente les analogies entre les variables de puissance et d'énergie dans les principaux domaines concernés dans les systèmes mécatroniques. Dans les domaines chimiques et thermodynamiques, l'intégration des efforts (température ou potentiel

Domaine physiques	Variables de puissance		Variables d'énergie	
	Effort e	Flux f	Moment généralisé p	déplacement généralisé q
Mécanique de translation	Force F (N)	Vitesse v (m/s)	Quantité de mouvement p (kg.m/s)	Déplacement x (m)
Mécanique de rotation	Couple C (N.m)	Vitesse angulaire ω (rad/s)	Moment cinétique p_ω (kg.m ² .rad/s)	Angle θ (rad)
Électrique	Tension u (V)	Courant i (A)	Flux magnétique total λ (V.s)	Charge q (C)
Hydraulique	Pression P (Pa)	Débit volumique Q_v (m ³ /s)	Moment de pression P_p (Pa.s)	Volume V (m ³)
Thermodynamique	Température T (K)	Débit d'entropie \dot{S} (J/(K.s))	-	Entropie S (J/K)
Chimie	Potentiel chimique μ (J/mole)	Débit molaire \dot{n} (mole/s)	-	Quantité molaire n mole

Tableau 2.1: Variables de puissance et d'énergie (et leurs unités SI) associées à différents domaines de la physique

chimique) par rapport au temps n'ont pas de signification physique directe. Voilà pourquoi, les moments généralisés p ne sont pas définis dans le Tableau 2.1 pour ces domaines.

2.3.1 Les éléments du Bond Graph

Il existe neuf éléments bond graph (Se , Sf , R , C , I , 0 , 1 , TF , GY) qui sont classés en quatre catégories : les éléments actifs, les éléments passifs, les éléments de jonction et les éléments de détections (capteurs).

a- Éléments actifs

Les sources sont appelées éléments actifs dans la notation Bond Graph. Ils contribuent à fournir de la puissance au système. Leur type est indiqué soit par un indice « e » ou « f » selon que la source impose sur le système soit un effort ou un flux. En fonction du type de variable d'alimentation de la source fournie, la modélisation Bond Graph à deux éléments sources : source d'effort (Se) et source de flux (Sf). La Figure 2.9 montre la représentation Bond Graph de ces éléments. Puisque les sources fournissent de l'énergie, l'orientation de la demi-flèche est fixée, et supposée sortante de la source, autrement dit, orientée vers le système auquel la puissance est imposée.

Source d'effort : elle impose un effort, qui peut être une fonction du temps, mais indépendante de la variable flux. Par exemple : le générateur de tension électrique, la pompe de pression, la source de la température, la gravité, etc.

Source de flux : elle fournit au système un flux indépendant de l'effort. Par exemple : le générateur de courant électrique, la vitesse imposée à un système mécanique, la pompe hydrostatique entraînée avec une fréquence de rotation constante. Si une telle pompe est équipée d'un régulateur de pression idéal, il devient alors une source d'effort avec l'effort (pression) indépendant du flux.

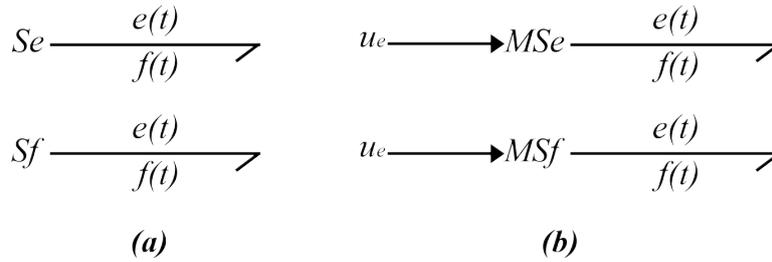


Figure 2.9: Éléments actifs : sources d'effort et de flux (a), sources d'effort et de flux modulés (b).

Sources modulées : beaucoup des sources d'efforts et de flux sont contrôlées (par un signal). Elles sont nommées sources modulées (MSe ou MSf) et sont mises en évidence par une lettre M « modulée » qui précède les symboles de source comme indiqué sur la Figure 2.9(b). Par exemple, une pompe peut être commandée par un signal de commande externe pour réguler sa vitesse.

b- Éléments passifs

Les éléments R , I et C sont dits éléments passifs, car ils transforment la puissance qui leur est fournie en énergie dissipée (élément R) ou stockée sous forme d'une énergie cinétique (élément I) ou d'une énergie potentielle (élément C). Ces éléments sont appelés, élément uni-port, car ils sont connectés à un système par un seul port. Par convention, la demi-flèche est orientée vers l'élément comme illustré sur la Figure 2.9, où J indique une jonction (1 ou 0).

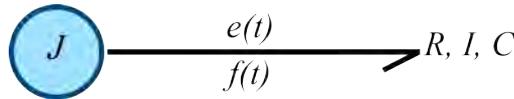


Figure 2.10: Représentation des éléments passifs.

Selon la façon dont la puissance est transformée par le port, les éléments passifs sont classifiés en éléments résistifs (R), éléments capacitifs (C) et éléments inertiels (I).

L'élément R : il est utilisé pour modéliser tout phénomène physique liant la variable d'effort e à la variable de flux f (Équation 2.2). Il est dissipatif d'énergie et la puissance qui lui est transmise est transformée en chaleur (considérée ici comme dissipée). La Figure 2.11 montre le modèle Bond Graph et les croquis des éléments résistances dans plusieurs domaines de la physique. Pour les systèmes physiques, l'élément R peut représenter : une résistance électrique, du frottement et de l'amortissement mécanique, une résistance hydraulique et une résistance thermique.

$$e(t) = \Phi_R(f(t)) \quad (2.2)$$

L'élément C : il est utilisé pour modéliser tout phénomène physique liant la variable d'effort e à la variable de déplacement q (Équation 2.3). Dans la Figure 2.12, le modèle Bond Graph et quelques exemples physiques des phénomènes de stockage d'énergie potentielle sont présentés. L'élément C peut être représenté : le condensateur électrique, le ressort mécanique, le réservoir de stockage et les barres de torsion, etc.

$$e(t) = \Phi_C(q(t)) \quad (2.3)$$

L'élément I : il est utilisé pour modéliser tout phénomène physique liant la variable de flux f à la variable de moment p (Équation 2.4). L'élément I transforme la puissance reçue en énergie cinétique pour les systèmes mécaniques et en énergie magnétique pour les systèmes électriques. Le modèle Bond Graph et quelques exemples physiques sont présentés sur la Figure 2.13. L'élément I est utilisé pour

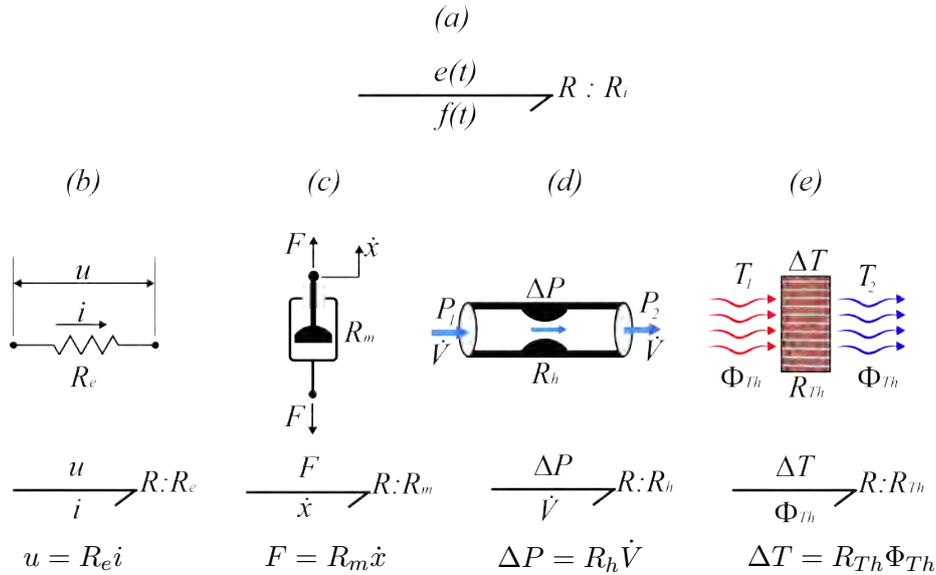


Figure 2.11: Représentation bond graph de l'élément R (a), la résistance électrique (b), l'amortissement mécanique (c), la résistance hydraulique (d), résistance thermique (e).

modéliser les phénomènes d'inductance dans les systèmes électriques, la masse ou l'inertie dans les systèmes mécaniques ou hydrauliques, ect.

$$p(t) = \Phi_I(f(t)) \tag{2.4}$$

Citons également, à titre d'exemple, les éléments présentés sur la Figure 2.14 qui reçoivent de la puissance par plusieurs ports, de natures pouvant être différentes; ils sont modélisés par des éléments « multiports » comme indiquer la Figure 2.14, associés à des lois matricielles.

c- Éléments d'interconnexion

Les éléments d'interconnexion permettent de connecter les éléments actifs (Se et Sf) et passifs (R , I et C) afin de représenter le système complet. Deux catégories d'éléments d'interconnexion existent : les éléments de jonction et les éléments de transduction.

Les éléments de jonction : à effort commun (*jonction* – 0) ou à flux commun (*jonctions* – 1) permettent de décrire des bilans d'énergie entre les éléments en respectant les lois de conservations de la physique. Les lois de conservations sont notamment les lois de Kirchoff en électricité et les lois de conservation de la quantité de mouvement et de la masse en mécanique. Ce sont des jonctions de type n-ports; c'est-à-dire qu'elles peuvent accueillir autant de liens que nécessaire. La représentation Bond Graph des jonctions 0 et 1 est montrée sur la Figure 2.15.

Dans toutes les jonctions, la conservation d'énergie peut être exprimée comme suit (Équation 2.5):

$$\sum_{i=1}^n e_i f_i = 0 \tag{2.5}$$

Avec n le nombre des ports. Les signes apparaissant dans les lois constitutives de ces éléments dépendent de l'orientation des liens de puissance. Une variable est pondérée par un signe + si la demi-flèche est entrante et par un signe - si la demi-flèche est sortante.

Pour le modèle Bond Graph de la Figure 2.15, deux demi-flèches sont entrantes dans la jonction (les bonds 1 et 4) et deux demi-flèches sont sortantes de la jonction (les bonds 2 et 3), donnant ainsi la loi de conservation (Équation 2.7) :

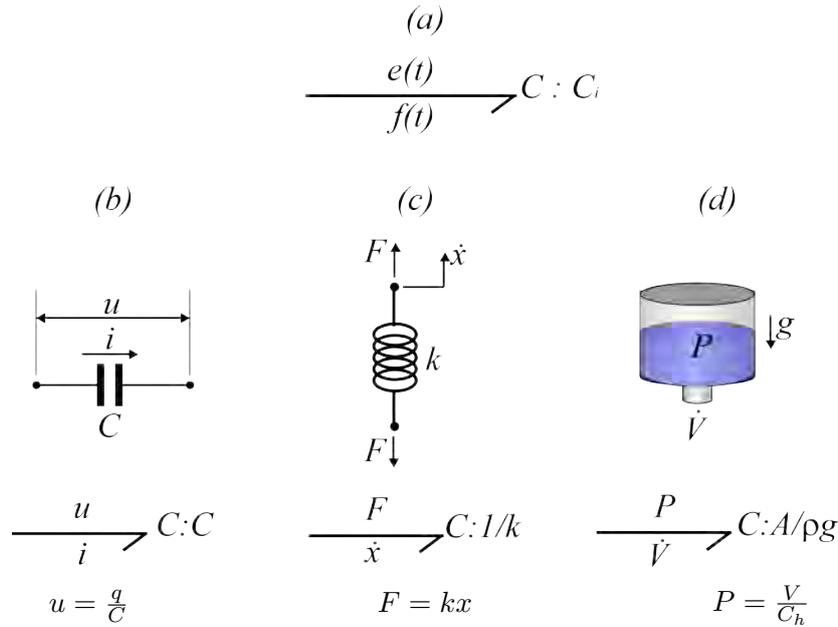


Figure 2.12: Représentation Bond Graph de l'élément C (a), le condensateur électrique (b), le ressort mécanique (c), le réservoir de stockage (d).

$$e_1 f_1 + e_4 f_4 - e_2 f_2 - e_3 f_3 = 0 \tag{2.6}$$

Pour la jonction 0, les efforts sur tous les liens arrivant ou partant de la jonction sont les mêmes. Elle est dite à effort commun, et la somme algébrique des flux est égale à zéro. Les équations constitutives (à partir de la Figure 2.15) peuvent être rédigées comme (Équation 2.7) :

$$\begin{cases} f_1 + f_4 - f_2 - f_3 = 0 \\ e_1 = e_2 = e_3 = e_4 \end{cases} \tag{2.7}$$

En mécanique, la jonction 0 représente une compatibilité géométrique pour une situation impliquant une seule force et plusieurs vitesses, dont la somme algébrique égale à zéro. Il représente, pour le système électrique, la loi de Kirchhoff pour un nœud. Dans les systèmes hydrauliques, il représente une conservation du débit volumique / massique à un point où plusieurs tuyaux se rejoignent.

Pour la jonction 1, les flux sur tous les liens arrivant ou partant de la jonction sont les mêmes. Elle est dite à flux commun, et la somme algébrique des efforts est égale à zéro. Les équations constitutives (à partir de la Figure 2.15) peuvent être rédigées comme (Équation 2.8):

$$\begin{cases} e_1 + e_4 - e_2 - e_3 = 0 \\ f_1 = f_2 = f_3 = f_4 \end{cases} \tag{2.8}$$

La jonction 1 représente en mécanique l'équilibre dynamique des forces associées à une vitesse commune. Dans le circuit électrique, elle représente la loi de Kirchhoff pour la tension (loi des mailles) pour un circuit en série. Lorsque des composants d'un circuit hydraulique en connexion série et le débit volumique/massique est le même, la somme algébrique des pressions égale à zéro, ceci peut être assuré par la jonction 1.

Les éléments de transduction : ce sont les éléments transformateurs (TF) et gyrateurs (GY) qui permettent de modéliser les transformations parfaites de puissance et les couplages entre différents domaines de la physique.

L'élément transformateur TF est associé à un transfert d'énergie couplant les efforts entre eux dans un certain rapport et les flux entre eux dans le rapport inverse (Équation 2.9).

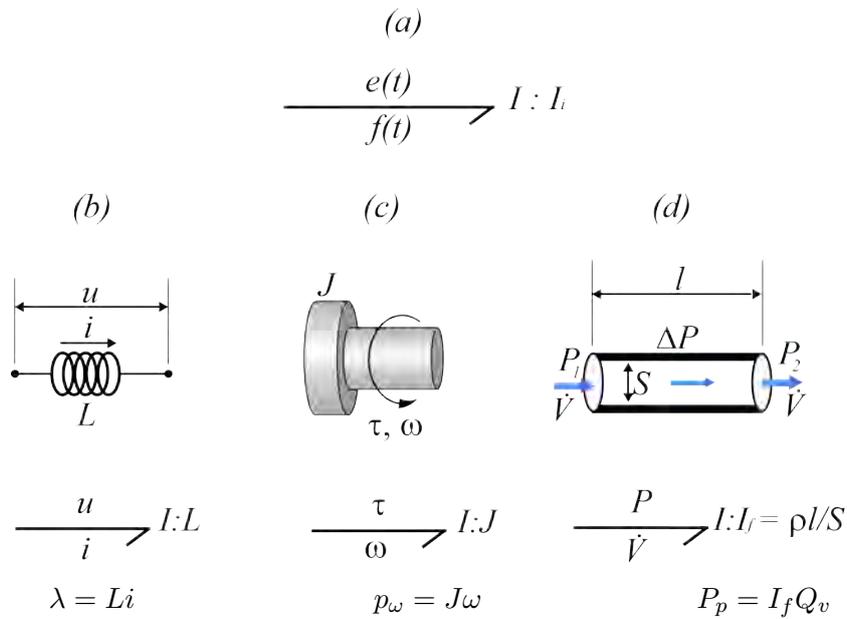


Figure 2.13: Représentation bond graph de l'élément I (a), l'inductance électrique (b), l'inertie mécanique (c), l'inertie de fluide (d).

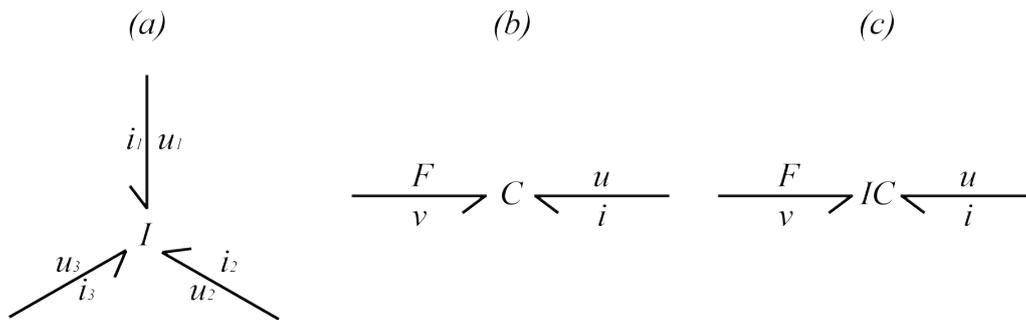


Figure 2.14: Représentation bond graph d'éléments multiports : 3 bobinages (a), condensateur à armature mobile (b), solénoïde à noyau mobile (c).

$$\begin{cases} e_1 = m e_2 \\ f_2 = m f_1 \end{cases} \quad (2.9)$$

où m est appelé le module du transformateur, si le module de transformateur m n'est pas constant, l'élément transformateur TF est alors appelé un transformateur modulé et noté par MTF .

L'élément transformateur TF modélise le transformateur électrique pour un système électrique, le réducteur de vitesse pour un système mécanique de rotation, ou un simple levier pour la mécanique de translation, un vérin pour un système hydraulique (Figure 2.16). L'élément TF idéal ne stocke et ne dissipe pas de l'énergie.

L'élément gyrateur GY assure une transduction de l'énergie d'un domaine à un autre en couplant, de façon croisée, les efforts et les flux (Équation 2.10), par exemple un moteur électrique, qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique de rotation (Figure). La constante de proportionnalité r est appelée ratio ou module de gyrateur. Ce module peut être réglable, et son taux de conversion peut être modulé par un signal appliqué par l'intermédiaire d'une liaison activée. Ceci est représenté par le symbole MGY (gyrateur modulé). Comme exemple, un moteur électrique, dont l'intensité de champ, est variable.

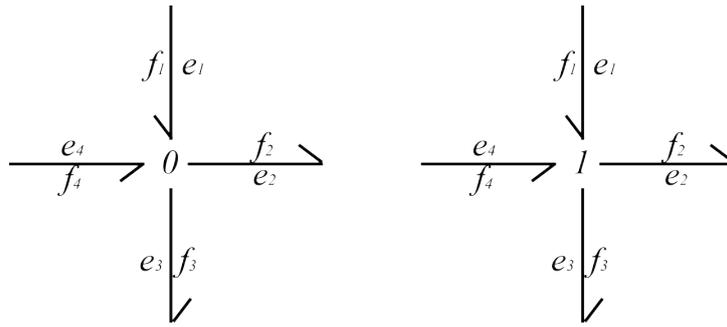


Figure 2.15: Représentation bond graph des jonctions 0 et 1.

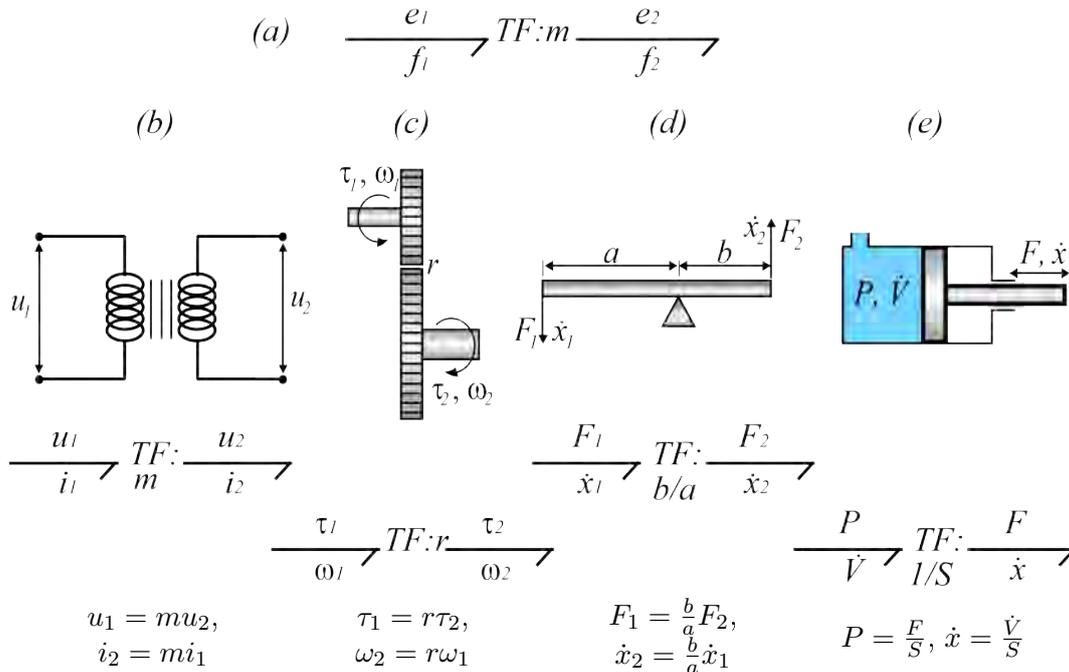


Figure 2.16: Représentation bond graph de l'élément TF (a), transformateur électrique (b), réducteur de vitesse (c), levier mécanique (d), vérin hydraulique (e).

$$\begin{cases} e_1 = rf_2 \\ e_2 = rf_1 \end{cases} \quad (2.10)$$

d- Les éléments de détections

Si les entrées du modèle sont explicitement représentées par des phénomènes idéalisés d'apport d'énergie (éléments bond graph Se et Sf), il peut être utile pour des besoins d'analyse de faire également apparaître les sorties du système. Pour cela, de nouveaux éléments passifs ont été introduits. Il s'agit de détecteur d'effort (élément bond graph De) et de flux (élément bond graph Df) (Figure 2.18). Ils correspondent en quelque sorte à des capteurs idéaux. La puissance qui leur est associée est nulle et placée sur des jonctions adéquates, leur ajout ne modifie en rien le comportement dynamique du modèle.

2.3.2 La causalité d'un Bond Graph

a- Objectifs de la causalité

Un modèle Bond Graph est dit acausal, ceci signifie que les relations mathématiques associées aux différents éléments bond graph n'ont pas été orientées. Cependant, pour des besoins de simulation,

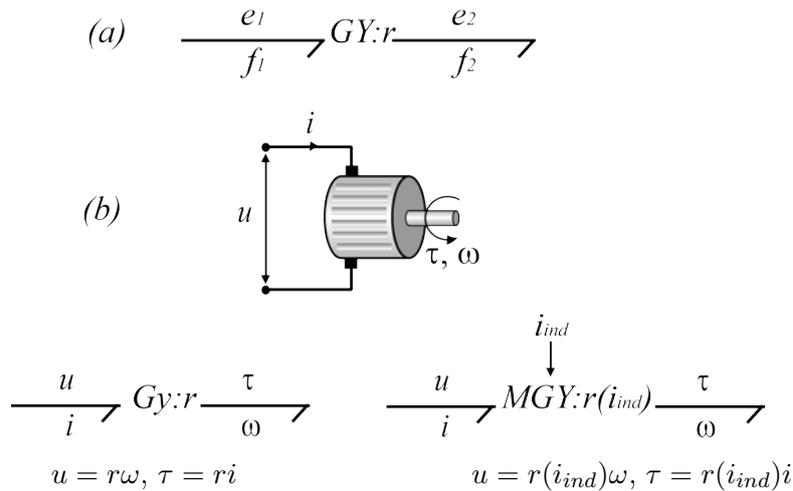


Figure 2.17: Représentation bond graph de l'élément GY (a), moteur électrique (b).

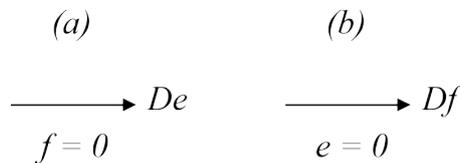


Figure 2.18: Détecteur d'effort imposant un flux nul (a), détecteur de flux imposant un effort nul (b).

l'orientation des équations (ou en d'autres termes, la structure de calcul des équations) est nécessaire. Les équations doivent être mises sous la forme d'une séquence d'affectations permettant de déterminer les sorties du modèle à partir des entrées et des paramètres du modèle. Un modèle causal peut alors être obtenu à partir de la représentation Bond Graph acausale en lui affectant une causalité de calcul.

Lorsque les modèles sont utilisés pour simuler le comportement dynamique d'un système, le modèle utilisé est dit direct, car le schéma de calcul utilisé respecte la causalité physique du système : les équations sont orientées selon le sens des lois physiques qui repose sur le principe bien connu que l'effet d'un phénomène physique ne peut précéder sa cause.

b- Convention de la causalité

La causalité est marquée par un trait perpendiculaire à l'extrémité d'un lien. Par convention, le trait causal est placé du côté de l'élément sur lequel l'effort est imposé, le flux est donc imposé de l'autre côté du lien (Figure 2.19).

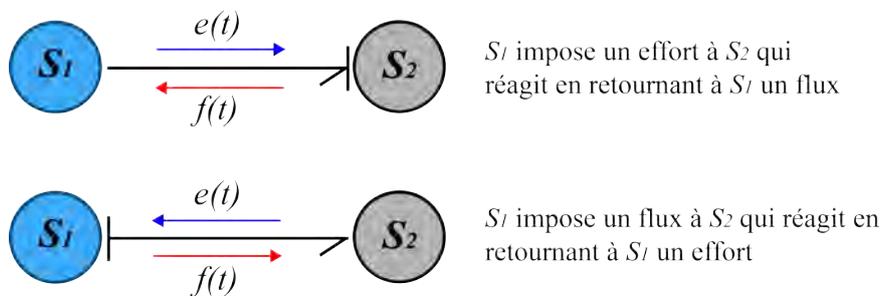


Figure 2.19: Représentation Bond Graph du principe de causalité.

c- Règle d'affectation de la causalité

La causalité est affectée selon les règles spécifiques suivantes [55]:

- Les éléments sources (Se et Sf) imposent une causalité unique. Pour une source d'effort Se , le trait causal est placé du côté de la flèche tandis qu'il s'agit de l'inverse, pour une source de flux Sf .
- Pour les jonctions 1, les jonctions 0, les transformateurs et les gyrateurs, une contrainte de causalité est imposée (Tableau 2.2). Pour les éléments de stockage C et I , le choix de la causalité intégrale est généralement préférée au choix de la causalité différentielle. Pour l'élément de dissipation R , il n'y a aucune préférence.

2.3.3 Procédure de construction du Bond Graph

La procédure de construction de modèles Bond Graph sera maintenant détaillée.

1. Disposer les sources d'énergie : les sources d'efforts (Se) et/ ou source de flux (Sf).
2. Placer les principaux éléments Bond Graph représentant les phénomènes énergétiques des éléments du système : les éléments de stockage (I et C) et de dissipation (R).
3. Interconnecter ces éléments en effectuant des bilans d'énergie en respectant les lois de conservation de la physique. Cette étape est réalisée à l'aide des éléments de jonction (les jonctions 0,1) et des éléments de transduction (les éléments transformateurs (TF) et les éléments gyrateurs (GY)).
4. Affecter la causalité : La procédure suivante permet de propager la causalité (procédure SCARP [57]).
 - (a) Affecter les causalités imposées par les éléments sources d'effort et de flux et les propager aussi loin que possible en prenant en compte les contraintes imposées par les transformateurs, gyrateurs, jonctions 0 et jonctions 1.
 - (b) Affecter la causalité intégrale (de préférence) aux éléments de stockage I et C et la propager dans le Bond Graph.
 - (c) Affecter une causalité arbitraire aux éléments dissipatifs R et la propager dans le Bond Graph.
 - (d) Si le Bond Graph n'est pas complet d'un point de vue causal, affecter une causalité arbitraire aux éléments non traités et la propager au sein du Bond Graph. Si lors des étapes (b) à (d), il existe un conflit, il faut alors utiliser une causalité différentielle pour les éléments C et I de manière à lever le conflit. La présence d'éléments de stockage en causalité dérivée indique que les équations déduites du Bond Graph seront des équations algèbro-différentielles. Cette situation se rencontre lors de la représentation Bond Graph de systèmes mécaniques bouclés. Dans ce manuscrit, la technique des perturbations singulières a été utilisée pour modifier le modèle de manière à éviter d'avoir des éléments de stockage en causalité dérivée.

2.3.4 Chemin causal, boucle causale

Le parcours d'un modèle Bond Graph peut se faire en suivant le transfert de la puissance (à l'aide des « lignes de puissance ») ou en suivant la propagation de la causalité. C'est ce deuxième cas que nous envisageons ici.

Chaque lien du Bond Graph étant porteur de deux variables, e et f , il est possible de parcourir le Bond Graph en suivant deux chemins, en suivant soit la variable effort soit la variable flux.

Sur un modèle Bond Graph causal, un chemin causal est une suite ordonnée de variables (d'effort et/ou de flux) mises en relations les unes aux autres par les équations du modèle. L'ordonnement de cette suite est conforme à la causalité du modèle. Un chemin causal permet de mettre en évidence comment une variable influence mathématiquement sur une autre variable. Un chemin causal E/S est un

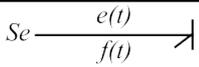
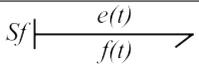
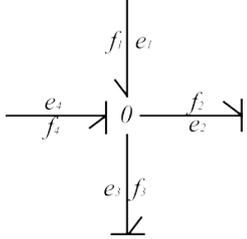
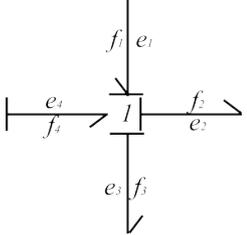
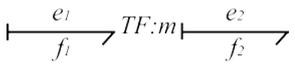
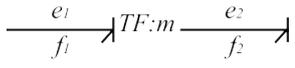
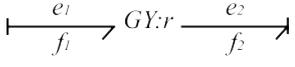
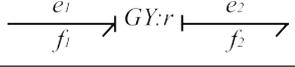
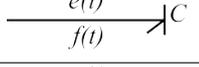
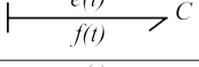
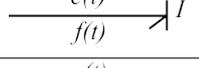
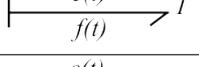
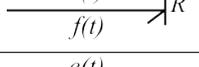
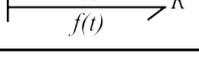
Éléments bond graph et causalités possibles	Schémas de calcul	Commentaires
	$e(t)$ est connu	Causalité imposée
	$f(t)$ est connu	Causalité imposée
	$\begin{cases} e_4 = e_1 \\ e_4 = e_2 \\ e_4 = e_3 \\ f_4 = -f_1 + f_2 + f_3 \end{cases}$	Un seul effort est imposé sur la jonction 0
	$\begin{cases} f_4 = f_1 \\ f_4 = f_2 \\ f_4 = f_3 \\ e_4 = -e_1 + e_2 + e_3 \end{cases}$	Un seul flux est imposé sur la jonction 1
	$\begin{cases} e_1 = m e_2 \\ f_2 = m f_1 \end{cases}$	Causalité directe
	$\begin{cases} e_2 = \frac{e_1}{m} \\ f_1 = \frac{f_2}{m} \end{cases}$	Causalité inverse
	$\begin{cases} e_1 = r f_2 \\ e_2 = r f_1 \end{cases}$	Causalité directe
	$\begin{cases} f_2 = \frac{e_1}{r} \\ f_1 = \frac{e_2}{r} \end{cases}$	Causalité inverse
	$f = \frac{d}{dt}(\Phi_C^{-1}(e))$	Causalité dérivée
	$e = \Phi_C(\int f dt) = \Phi_C(q)$	Causalité intégrale
	$f = \Phi_I(\int e dt) = \Phi_I(p)$	Causalité intégrale
	$e = \frac{d}{dt}(\Phi_I^{-1}(f))$	Causalité dérivée
	$f = \Phi_R^{-1}(e)$	Causalité conductance
	$e = \Phi_R(f)$	Causalité résistance

Tableau 2.2: Causalités possibles pour les différents éléments bond graph

chemin causal entre une variable d'entrée et une variable de sortie du modèle (Figure 2.20(b)). Un chemin causal fermé entre deux éléments de type R , C , et I permet de définir une boucle causale, qui comprend les deux chemins élémentaires aller et retour (Figure 2.20(b)).

Dans le cas linéaire, les gains d'un chemin causal T_i et d'une boucle causale B_j sont obtenus à l'aide des Équations 2.11 et 2.12.

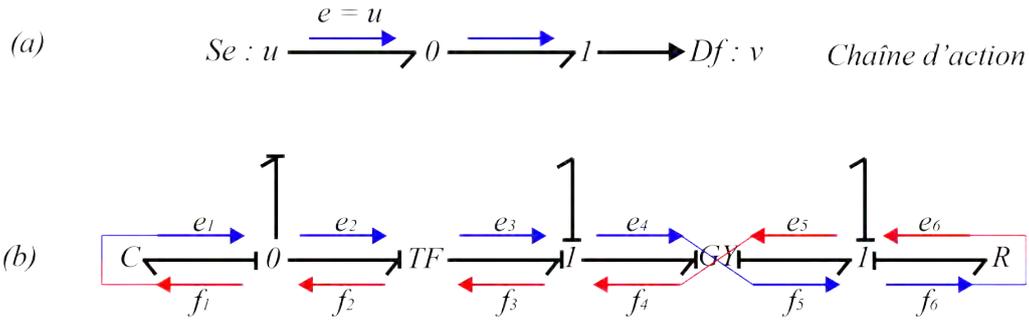


Figure 2.20: Chemin causal et boucle causale dans un Bond Graph.

$$T_i = (-1)^{n_0+n_1} \prod_i m_i^{k_i} \prod_j r_j^{l_j} \tag{2.11}$$

$$B_j = (-1)^{n_0+n_1} \prod_i (m_i^{k_i})^2 \prod_j (r_j^{l_j})^2 \prod_k g_k \tag{2.12}$$

où

- m_i (respectivement r_j) est le module du i ème TF (respectivement j ème GY), avec un exposant k_i (respectivement l_j) qui vaut $+1$ ou -1 suivant la causalité du TF_i (respectivement GY_j).
- $n_0 + n_1$ est le nombre de changements d'orientation des demi-flèches aux jonctions 0 (respectivement 1) quand on suit la variable flux (respectivement effort).
- g_k est le gain (ou transmittance) de l'élément R , C , ou I traversé par le chemin causal ou la boucle causale, qui dépend de la causalité qui lui est affectée. Ces gains sont donnés dans le Tableau 2.3 où s est la variable de Laplace. Les gains sont essentiellement des fonctions de transfert élémentaires.

Élément	Causalité	Gain
Élément R	Causalité résistance	R
	Causalité conductance	$1/R$
Élément C	Causalité intégrale	$1/Cs$
	Causalité dérivée	Cs
Élément I	Causalité intégrale	$1/Is$
	Causalité dérivée	Is

Tableau 2.3: Gain des éléments passifs.

Les gains de boucles causales fournissent une estimation des dynamiques du modèle, ce qui peut être utile pour faire de la simplification de modèles sur critères dynamiques ou fixer le pas de calcul pour la simulation.

2.3.5 L'inversion en langage Bond Graph

Maintenant que le langage Bond Graph a été présenté comme un outil pour la modélisation et l'étude des systèmes mécatroniques, étudions maintenant la possibilité de traiter des modèles inverses en langage Bond Graph (modèles a priori plus pertinents pour le dimensionnement et la commande des systèmes mécatroniques).

Le concept de causalité est une notion clé pour l'exploitation d'un modèle Bond Graph. Basé sur le principe physique de causalité (c.-à-d. si un sous-système S_1 impose un effort à un sous-système S_2 alors S_2 réagit nécessairement en imposant un flux à S_1), ce concept permet d'orienter les équations d'un modèle Bond Graph pour le transformer en un modèle de simulation conforme à l'expérimentation choisie. La méthode d'inversion en langage Bond Graph a beaucoup évolué grâce

notamment à l'introduction par Gawthrop de la notion de bicausalité [84]. Vue quelque part comme une extension de la causalité classique, cette notion permet d'envisager de nouveaux schémas de calculs physiquement irréalisables et pourtant mathématiquement possibles (c.-à-d. un sous-système S_1 peut imposer à la fois un effort et un flux à un sous-système S_2). Ceci se représente graphiquement comme indiqué Figure 2.21, en décomposant le trait causal en deux demi-trait causaux.

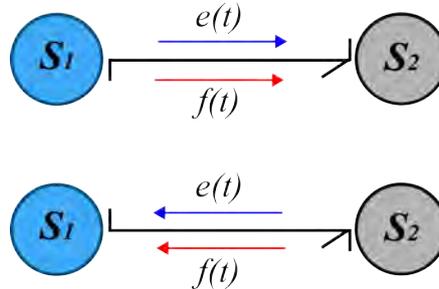


Figure 2.21: Bicausalité.

De nouveaux éléments Bond Graph capables d'imposer (ou de se voir imposer) à la fois un effort et un flux ont également été introduits (Figure 2.22).

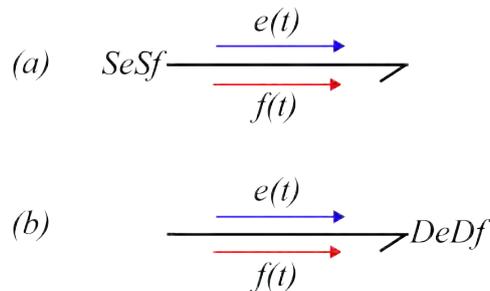


Figure 2.22: Double source imposant l'effort et le flux (a), double détecteur d'effort et de flux (b).

Ainsi, si la causalité Bond Graph pouvait être confondue avec la notion de causalité au sens de la physique, la bicausalité, elle, ne représente plus du tout des relations de cause à effet. Elle est dédiée à la représentation de schémas calculatoires non nécessairement physiques. À ce titre, la bicausalité peut être vue comme une extension de la causalité Bond Graph.

a- Affectation de la bicausalité

Comme précédemment, des procédures existent pour attribuer des traits bicausaux aux liens de puissance d'un modèle Bond Graph. Dans ces cas, l'organisation des équations en un modèle global de simulation repose, d'une part, sur la propagation de la bicausalité des éléments doubles sources $SeSf$ vers les éléments doubles détecteurs $DeDf$ et, d'autre part, sur une affectation causale (au sens classique) des autres éléments du modèle.

La procédure suivante permet de propager la bicausalité de manière à construire le modèle inverse d'un système à m entrées et m sorties. Là encore comme un modèle d'état est recherché, une causalité intégrale sera préférentiellement affectée aux éléments de stockage d'énergie.

1. Dans le modèle Bond Graph en causalité préférentiellement intégrale, choisir un ensemble de lignes de puissance E/S disjointes associées à des chemins causaux E/S disjointes. Si un tel ensemble n'existe pas, alors le modèle n'est pas inversible et la procédure s'arrête.
2. Dans le modèle Bond Graph acausal, remplacer les sources (respectivement les détecteurs) associées aux entrées (respectivement aux sorties) par des doubles détecteurs $DeDf$ (respectivement des doubles sources $SeSf$).

3. Pour chaque élément dont la causalité est imposée (source, élément non inversible), affecter cette causalité obligatoire et propager cette causalité à travers la structure de jonction en respectant les contraintes de causalité des jonctions 0 et 1 et des éléments TF et GY .
4. Le long de chaque ligne de puissance choisie à l'étape 1, propager la bicausalité de la double source vers le double détecteur. Puis, propager la causalité à travers le modèle Bond Graph en utilisant les contraintes de causalité des jonctions 0 et 1 et des éléments TF et GY . Si des conflits causaux ou des boucles causales non résolubles apparaissent, recommencer les étapes précédentes avec un autre ensemble de lignes de puissances E/S disjointes. Si aucun de ces ensembles ne résout les conflits causaux, alors le système n'est pas inversible et la procédure s'arrête.
5. Pour les éléments de stockage d'énergie, affecter une causalité préférentiellement intégrale si possible et la propager à travers le modèle Bond Graph comme à l'étape précédente.
6. S'il reste des éléments R non déterminés causalement, affecter une causalité arbitraire sur un de ces éléments et la propager comme précédemment.
7. Répéter l'étape 6 jusqu'à ce que chaque élément R soit déterminé causalement.
8. Si le modèle Bond Graph n'est pas complètement déterminé causalement, affecter une causalité arbitraire sur un lien Bond Graph sans trait causal et la propager comme précédemment.
9. Répéter l'étape 8 jusqu'à ce que le modèle bond graph soit complètement déterminé causalement.

2.3.6 Les différents contextes dans lesquels la méthode d'inversion peut être utilisée

La méthode par modèles Bond Graph inverses peut être utilisée dans plusieurs contextes d'ingénierie comme :

a- Synthèse d'architecture

Au début de la conception de la chaîne d'actionnement, le concepteur connaît uniquement l'architecture de la charge à mouvoir et les trajectoires (c.-à-d. les sorties spécifiées) qu'il doit lui faire suivre. À partir de ces données et de son niveau d'expertise, le concepteur doit alors choisir une architecture de la chaîne d'actionnement a priori adéquate. La méthode propose d'aider le concepteur dans cette tâche. En effet, en explicitant clairement les cheminements des apports d'énergie et de modulations de puissance, l'analyse structurelle permet au concepteur d'établir les conditions d'inversion du modèle, de déterminer quelles sont les sorties indépendamment commandables par les entrées disponibles et de répondre à des questions de type :

- Combien d'actionneurs faut-il pour atteindre les objectifs du cahier des charges ?
- Où placer, le long de la chaîne d'actionnement, les actionneurs et les capteurs nécessaires ?

L'analyse structurelle fournit ainsi de nouveaux critères de sélection, voire de synthèse d'architecture. En assurant un minimum de vérification quant à l'adéquation architecture/cahier des charges, elle permet d'éliminer, sans aucun calcul numérique, un certain nombre d'architectures qui se révéleraient, par la suite, inappropriées.

b- Aide à la rédaction du cahier des charges

L'analyse structurelle permet également de déterminer les ordres de dérivation minimaux que doivent présenter les sorties spécifiées pour générer, à partir du modèle inverse, des entrées physiquement réalisables. Ceci constitue à nouveau une aide précieuse pour le concepteur puisqu'il sait alors quel type de trajectoires il peut imposer à son système. En connaissance de cause, il peut ainsi adapter le cahier des charges ou bien, si cela n'est pas possible, revenir sur l'architecture du système. Quoi qu'il en soit, dans les deux cas, le concepteur est capable de détecter exactement la cause d'une mauvaise

formulation de son problème de conception. Il peut vérifier si son problème est bien posé en termes d'inversion, et ce sans effectuer une seule simulation. L'utilité a notamment été démontrée par [86] dans le cas d'une direction assistée électrique pour automobile.

c- Dimensionnement

Un problème de dimensionnement d'une chaîne d'actionnement consistait à sélectionner dans un catalogue les sous-systèmes ou les composants adéquats de la chaîne d'actionnement de manière à satisfaire le cahier des charges imposé [91]. En réalité, dans ce type de problème, les données sont la charge à actionner et les objectifs que cette charge doit accomplir (données fixées par le cahier des charges) tandis que les inconnues sont :

- Au niveau de développement système : les sous-systèmes de la chaîne d'actionnement tels que dispositifs de fourniture d'énergie, modulateurs de puissance, actionneurs et éléments d'adaptation d'énergie.
- Au niveau de développement sous-système : les composants de chaque sous-système.

Jusqu'à présent, les méthodes de sélection (méthodes de Newton et de Coeuillet) étaient basées sur des critères statiques : les grandeurs maximales à ne pas dépasser étaient établies à partir du cahier des charges dans des situations de vie jugées critiques. À ce titre, ces critères n'exploitaient pas la totalité des spécifications (ne prennent pas en compte des critères dynamiques) et pouvaient rendre pratique la sélection non pertinente. Pour contrer cet inconvénient, une approche par modèle inverse est possible. Un modèle inverse peut intuitivement être défini comme un second modèle qui, mis en cascade avec le modèle direct, permet d'obtenir en sortie les variables d'entrée du modèle direct. Globalement, le processus d'inversion consiste alors à partir du modèle direct, à dériver successivement les variables de sortie et à effectuer un certain nombre de transformations de manière à exprimer les variables physiques d'entrée en fonction des variables physiques de sortie, de leurs dérivées et des variables d'état. De nombreux travaux témoignent d'ores et déjà de l'intérêt porté à la résolution mathématique d'un tel problème d'inversion [85, 86].

Amara et SCAVARDA proposent une méthode de dimensionnement basée sur des modèles Bond Graph inverses [87], puis cette méthode est formalisée par [88, 89, 90].

La méthode de dimensionnement par modèles Bond Graph inverses se déroule en quatre étapes [91]:

Étape 1 : Adéquation

Le cahier des charges porte généralement sur la caractérisation de la charge à mouvoir et sur les tâches que celle-ci doit effectuer. Aussi, après lecture du cahier des charges, le concepteur peut construire le modèle Bond Graph de la charge et connaît la trajectoire que celle-ci doit suivre. L'étape d'adéquation consiste alors à partir du modèle bond graph causale de la charge (Figure 2.23) de manière à vérifier que le modèle est inversible et que les trajectoires spécifiées dans le cahier des charges ont été correctement choisies. Le concepteur s'assure ainsi qu'il y a une certaine adéquation et que les spécifications fixées par le cahier des charges sont effectivement atteignables par la structure du modèle choisi.

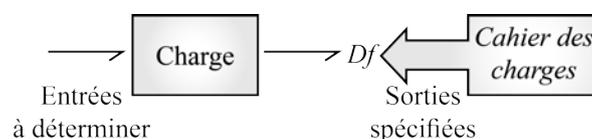


Figure 2.23: Dimensionnement par modèles Bond Graph inverses : étape d'adéquation modèle/cahier des charges.

Étape 2 : Spécification

Cette étape consiste à construire graphiquement, grâce au principe de bicausalité, le modèle Bond Graph inverse associé au problème de dimensionnement puis à le simuler de manière à calculer les évolutions des variables d'effort $e_{out}(t)$ et de flux $f_{out}(t)$ nécessaires en entrée de la charge pour que celle-ci suive parfaitement la trajectoire spécifiée $y_{spec}(t)$ (Figure 2.24). Cette étape permet ainsi de remonter les spécifications au niveau de l'entrée de la charge alors qu'elles étaient initialement rédigées au niveau de sa sortie.

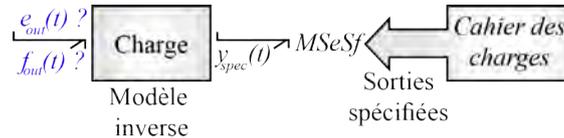


Figure 2.24: Dimensionnement par modèles bond graph inverse : étape de spécification.

Étape 3 : Sélection

Exploiter le modèle Bond Graph inverse ainsi obtenu pour déterminer directement les inconnues du problème de dimensionnement et sélectionner un actionneur à partir des spécifications imposées. Pour cela, comme les variables d'effort et de flux requises en entrée de la charge correspondent aux variables d'effort et de flux à fournir en sortie de l'actionneur, il suffit de comparer les évolutions calculées aux caractéristiques de sortie d'actionneurs existants (Figure 2.25). L'étape de sélection consiste ainsi à consulter les données constructrices d'une bibliothèque d'actionneurs et à comparer les maximums des variables calculées $e_{out}(t)$, $f_{out}(t)$ et $e_{out}(t) \cdot f_{out}(t)$ aux variables d'effort $e_{max_{out}}$, de flux $f_{max_{out}}$ et de puissance $P_{max_{out}}$ maximales que peuvent fournir chacun des actionneurs de cette bibliothèque. Seuls les actionneurs capables de fournir au moins $\max\{e_{out}(t)\}$, $\max\{f_{out}(t)\}$ et $\max\{e_{out}(t) \cdot f_{out}(t)\}$ sont retenus. Les autres actionneurs ne satisfaisant pas ces critères de sélection sont automatiquement éliminés : ils ne permettront pas de réaliser la tâche spécifiée dans le cahier des charges. Parmi les actionneurs retenus, plusieurs sont finalement sélectionnés sur de nouveaux critères non pris en compte jusqu'alors (encombrement, prix, etc.). Ces derniers devront être testés individuellement grâce à l'étape de validation.

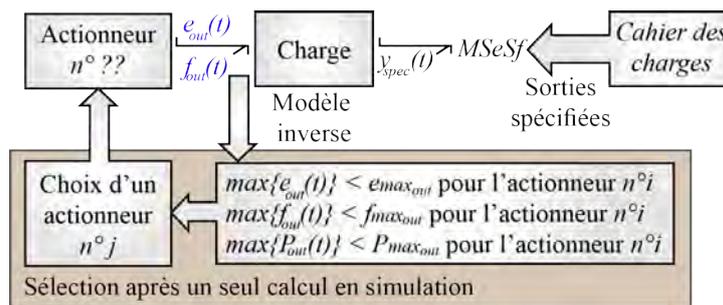


Figure 2.25: Dimensionnement par modèles bond graph inverse : étape de sélection.

Étape 4 : Validation

Si un actionneur a été choisi à l'étape précédente, celui-ci n'a été sélectionné que sur des critères portant sur ses variables de sortie. Il convient donc de vérifier ce qui se passe, entre autres, au niveau de ses variables d'entrée, de ses variables internes et de ses temps de fonctionnement, grâce à la dernière étape du dimensionnement de l'actionneur, étape dite de validation. Pour cela, cette étape consiste à (Figure 2.26) :

1. Modéliser l'actionneur choisi à l'étape de sélection ;
2. Coupler le modèle de l'actionneur au modèle de la charge ;

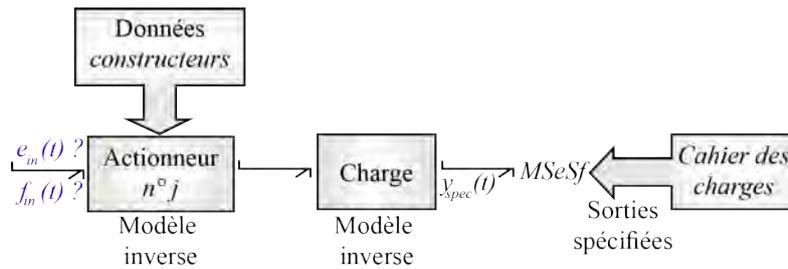


Figure 2.26: Dimensionnement par modèles bond graph inverse : étape de validation.

3. Vérifier que le modèle Bond Graph charge + actionneur est structurellement inversible et que le cahier des charges est en adéquation avec la structure de ce modèle (même démarche que pour l'étape d'adéquation) ;
4. Si le modèle charge + actionneur est inversible, construire le modèle Bond Graph inverse correspondant et le simuler de manière à calculer les évolutions des variables d'effort $e_{in}(t)$ et de flux $f_{in}(t)$ requises en entrée de l'actionneur pour que la charge suit parfaitement la trajectoire spécifiée ;
5. Valider ou infirmer le choix de l'actionneur en traçant les évolutions calculées $e_{in}(t)$ et $f_{in}(t)$ dans un plan (effort, flux) et en superposant le gabarit d'entrée de l'actionneur précédemment sélectionné (Figure 2.27 où les courbes sont paramétrées en fonction du temps).

d- Détermination de la commande en boucle ouverte

La méthode d'inversion permet de déterminer également la commande en boucle ouverte du système. Il suffit pour cela :

1. De modéliser chaque composant préalablement dimensionné.
2. De déclarer la commande, c'est-à-dire l'entrée du groupe fonctionnel « modulateur de puissance » comme une inconnue et de considérer les dispositifs de fourniture d'énergie et les trajectoires de sortie du système comme des données connues (c.-à-d. en langage Bond Graph, les sources du système sont laissées inchangées tandis que les détecteurs des variables de sortie sont transformés en doubles sources imposant les trajectoires spécifiées).
3. D'inverser le modèle global conformément aux entrées et sorties du système qui ont été déclarées (notons qu'alors seul le modèle du dispositif de fourniture d'énergie n'est pas inversé).
4. de lancer le calcul inverse en simulation afin d'obtenir l'évolution de la commande en boucle ouverte nécessaire pour, qu'à partir de l'apport d'énergie présumé, le système suive exactement les trajectoires imposées par le cahier des charges.

Remarque : En réalité, plusieurs cas peuvent apparaître lors de la détermination de la commande en boucle ouverte :

- soit le dispositif de fourniture d'énergie est fixé (cas étudié ci-dessus) ;
- soit le dispositif de fourniture d'énergie n'est pas fixé et reste à dimensionner.

Dans ce dernier cas, la détermination de la commande en boucle ouverte n'est plus aussi directe que ce nous avons présenté précédemment. Cependant, deux manières de procéder peuvent être imaginées :

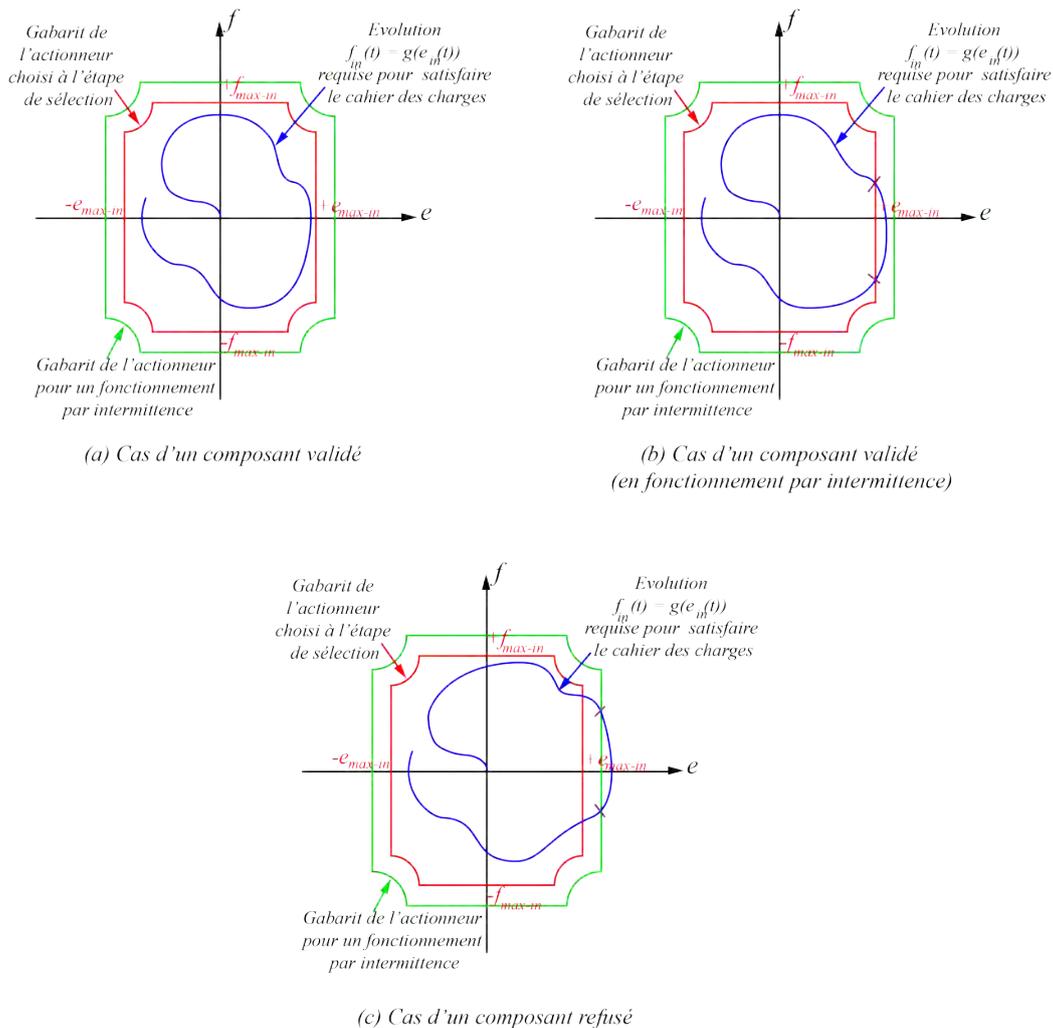


Figure 2.27: Dimensionnement par modèles Bond Graph inverses : étape de validation (suite).

- une première où des hypothèses sur la commande sont formulées afin de dimensionner le dispositif de fourniture d'énergie. Une fois ce dispositif de fourniture d'énergie fixé, la commande en boucle ouverte est ensuite déterminée selon les étapes évoquées précédemment ;
- une deuxième où des spécifications supplémentaires sont prises en compte afin de remonter les objectifs simultanément sur la commande et le dispositif de fourniture d'énergie.

2.3.7 Exemple d'application : système d'actionnement d'un axe d'une machine à commande numérique

Considérons ici la modélisation d'un système d'actionnement d'un axe d'une machine à commande numérique (Figure 2.28). Supposons que le problème de dimensionnement est de trouver un moteur électrique adéquat pour assurer la fonction d'actionnement et que le problème de commande est de commander le système pour atteindre une position désirée.

a- Modélisation

La démarche de modélisation d'un système en Bond Graph est illustrée sur le système d'actionnement d'un axe d'une machine à commande numérique (Figure 2.28). Ce système permet de déplacer une masse mobile positionnée au niveau d'une liaison glissière. Il se compose d'une source de tension contrôlable, d'un moteur à courant continu, d'un système de transmission vis-écrou, d'une table mobile et

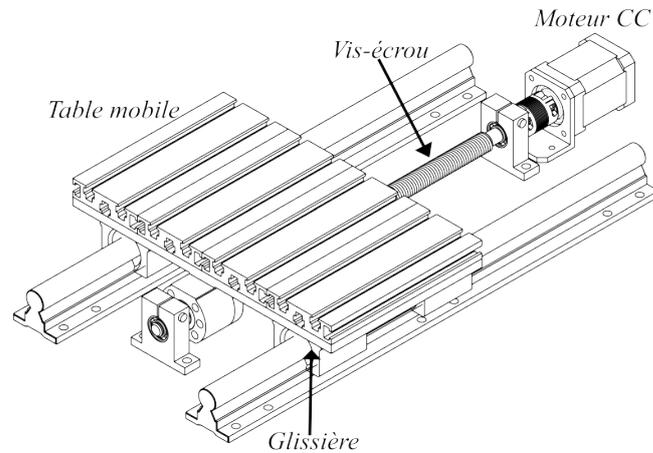


Figure 2.28: Système d'actionnement d'un axe d'une machine à commande numérique.

des capteurs de détections (capteurs de vitesse et de position). Le schéma technologique du système est illustré sur la Figure 2.29 :

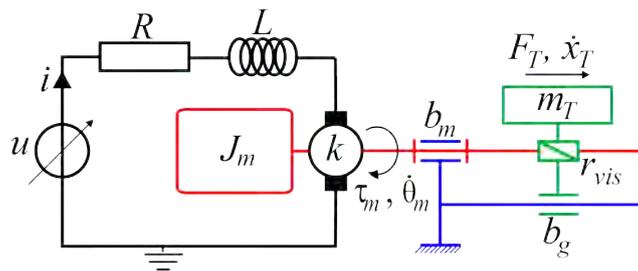


Figure 2.29: Schéma technologique d'un système d'actionnement d'un axe d'une machine à commande numérique actionnée par un moteur à courant continu.

Ce système est caractérisé par :

- Un circuit électrique composé d'une source de tension u .
- Un moteur à courant continu modélisé par une résistance électrique R et une bobine de paramètre constant L en série.
- Un couplage électromécanique de constante de couple k .
- Un arbre de sortie moteur, d'inertie J_m , supposé infiniment raide et soumis à des frottements visqueux de coefficient b_m .
- Un système vis-écrou de rapport r_{vis}
- Le frottement au niveau de la liaison glissière de coefficient b_g .
- La masse de la table mobile m_T .

Pour modéliser ce système en langage Bond Graph, il convient tout d'abord de construire son modèle Word Bond Graph (Figure 2.30). Conformément à l'approche systémique, celui-ci est composé de quatre composants qui sont : la source de tension, le moteur électrique, le système vis-écrou et la

table mobile. Un capteur peut éventuellement être ajouté si nous supposons vouloir observer la vitesse de translation et la position de la table mobile.



Figure 2.30: Modèle word bond graph d'un système d'actionnement d'un axe d'une machine à commande numérique actionnée par un moteur à courant continu.

La seconde phase de construction du modèle consiste à associer un modèle bond graph à chaque composant et à identifier ainsi les différents phénomènes énergétiques impliqués au sein de ceux-ci. Ici, après une analyse phénoménologique du système, nous obtenons un modèle Bond Graph (Figure 2.31) où :

Pour la partie électrique, la tension imposée aux bornes du circuit d'induit est représentée par une source d'effort Se . Au niveau du moteur électrique, la dissipation d'énergie par effet joule au niveau de la résistance interne du moteur est représentée par un élément R . Le stockage d'énergie magnétique dans l'inductance du moteur est représenté par un élément inertiel I . Une jonction 1 permet de coupler ces éléments qui sont parcourus par un même courant. L'élément GY permet de décrire le couplage électromagnétique au sein du moteur permettant de transformer le courant électrique en couple mécanique avec un rapport constant k .

Pour la partie mécanique, le stockage de l'énergie cinétique de l'arbre en rotation est représenté par un élément inertiel I . La dissipation d'énergie par frottement visqueux au niveau de la liaison pivot est représentée par un élément R . Une jonction 1 permet de coupler ces éléments de même vitesse. L'élément TF représente le comportement du système vis-écrou considéré comme parfait. De manière similaire à la représentation BG de la dynamique de l'arbre moteur en rotation, la représentation BG de la dynamique de la masse mobile est réalisée par le couplage à l'aide d'une jonction 1 d'un élément I et d'un élément R . Le stockage d'énergie cinétique de la masse mobile en translation est représenté par un élément inertiel I et la dissipation par frottement visqueux de la masse sur son support est représentée par un élément R , l'élément Df caractérise le capteur de vitesse, supposé ici idéal.

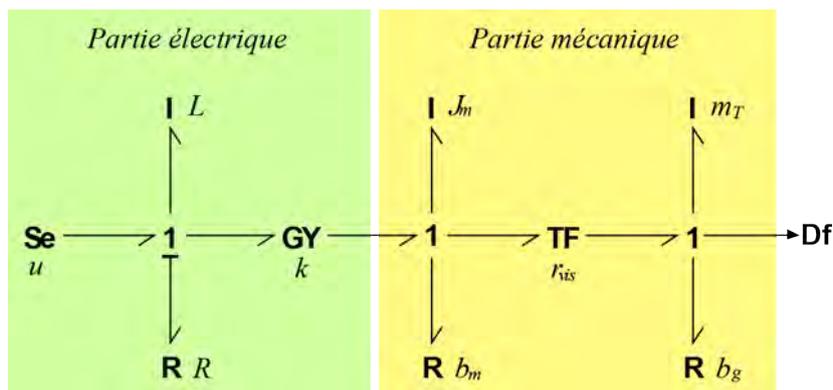


Figure 2.31: Modèle Bond Graph acausal d'un système d'actionnement d'un axe d'une machine à commande numérique actionnée par un moteur à courant continu.

D'après le modèle Bond Graph acausal (Figure 2.31), on sait qu'il y a deux phénomènes de stockage d'énergie. Par contre le Bond Graph acausal ne nous renseigne pas si les deux variables d'état sont indépendantes (causalité intégrale possible sur les 2 I) ou non (un I devra être mis en causalité dérivée). C'est l'affectation de la causalité qui le dira. La propagation de la causalité permet d'aboutir au bond graph causal de la Figure 2.32 :

Le modèle Bond Graph de la Figure 2.32 met en évidence un problème d'affectation de causalité sur une jonction 1 à droite. L'élément I est en causalité dérivée. Celle-ci peut être résolue, car les deux

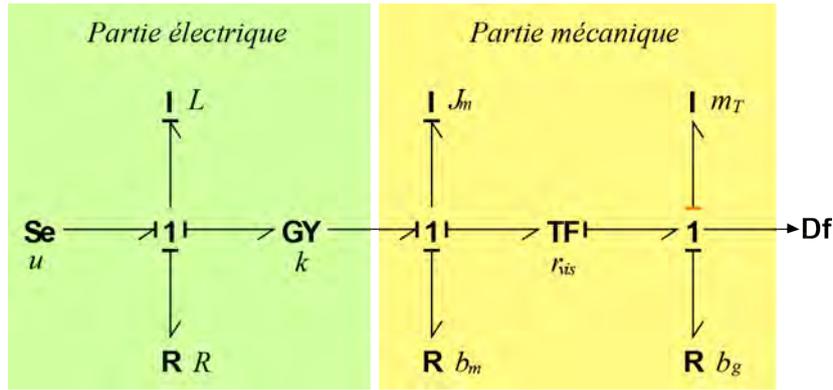


Figure 2.32: Modèle bond graph causal d'un système d'actionnement d'un axe d'une machine à commande numérique actionnée par un moteur à courant continu.

éléments I (J_m et m_T) sont placés en série, en faisant l'addition de leurs deux valeurs (résistances et inerties) en respectant le rapport de transformation.

Les expressions de l'énergie cinétique et la fonction de dissipation de la partie mécanique est données par (Équations 2.13 et 2.14) :

$$E_c = \frac{1}{2} J_m \dot{\theta}_m^2 + \frac{1}{2} m_T \dot{x}^2 \tag{2.13}$$

$$D = \frac{1}{2} b_m \dot{\theta}_m^2 + \frac{1}{2} b_g \dot{x}^2 \tag{2.14}$$

Avec, $\dot{\theta} = \frac{\dot{x}}{r_{vis}}$ donc :

$$E_c = \frac{1}{2} \left(\frac{J_m}{r_{vis}^2} + m_T \right) \dot{x}^2 = \frac{1}{2} J_{eq} \dot{x}^2 \tag{2.15}$$

$$D = \frac{1}{2} \left(\frac{b_m}{r_{vis}^2} + b_g \right) \dot{x}^2 = D = \frac{1}{2} b_{eq} \dot{x}^2 \tag{2.16}$$

Les paramètres $J_{eq} = \frac{J_m}{r_{vis}^2} + m_T$ et $b_{eq} = \frac{b_m}{r_{vis}^2} + b_g$ représentent l'inertie et le frottement équivalents de deux éléments I (J_m et m_T) et R (b_m et b_g). Le Bond Graph simplifié est donné sur la Figure 2.33.

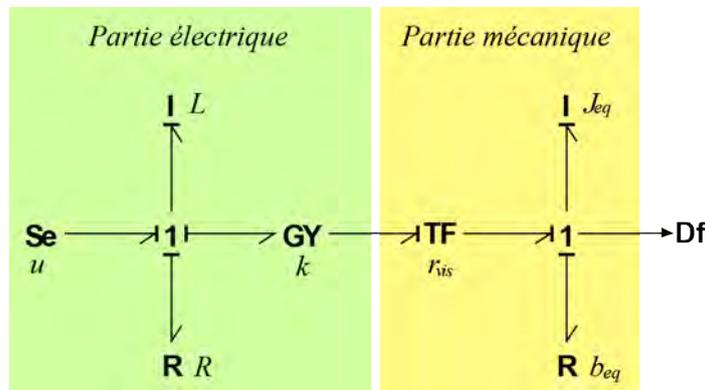


Figure 2.33: Modèle bond graph simplifié causal d'un système d'actionnement d'un axe d'une machine à commande numérique actionnée par un moteur à courant continu.

Remarque : Le problème de la causalité dérivée (Figure 2.32) peut être résolu par l'addition d'un élément parasite (élément C par exemple) entre les deux inerties.

Une simulation du comportement dynamique du système a été faite sous le logiciel *20-Sim* pour les paramètres présentés dans le Tableau 2.4.

Composants	Grandeurs	Valeurs
Moteur	Inductance	$L = 488 \times 10^{-6} H$
	Résistance	$R = 12.4 \Omega$
	Constante de couple	$k = 18.1 \times 10^3 N.m.A^{-1}$
	frottement pivot	$b_m = 27 \times 10^4 N.m.s.rad^{-1}$
	Inertie du moteur	$J_m = 2.25 \times 10^7 kg.m^2$
Vis-écrou	Rapport de réduction	$r_{vis} = 0.019$
Charge	Masse de la table	$m_T = 2 kg$
	frottement glissière	$b_g = 0.0015 N.s.m^{-1}$

Tableau 2.4: Valeurs des grandeurs du dispositif (Moteur à courant continu+Vis-écrou).

La Figure 2.34 montre la vitesse de translation de la table mobile pour une tension constante de 12V, pour cette tension la vitesse maximale atteinte par la table mobile est de 0.122m/s.

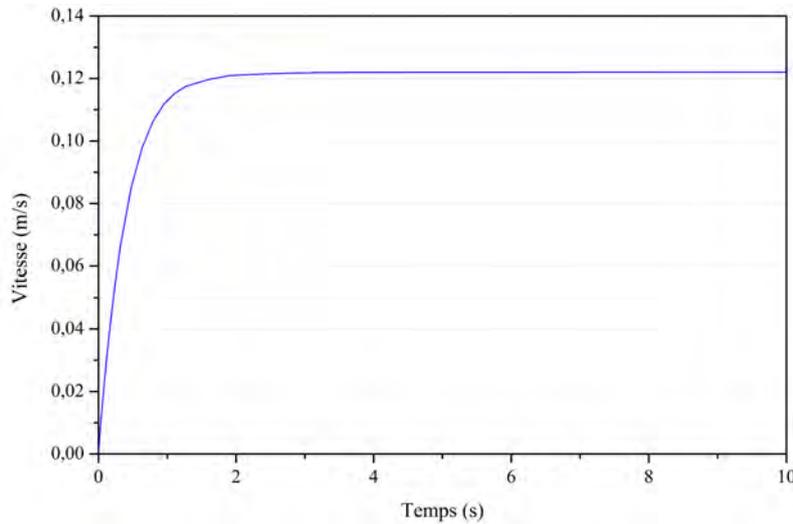


Figure 2.34: Simulation du système: vitesse de translation de la table mobile.

b- Dimensionnement

Comme nous l'avons présenté à la section 2.3.6, la méthode permet de sélectionner, de vérifier puis de valider chaque composant de la chaîne d'actionnement. Pour notre exemple, supposons que le problème de dimensionnement est de sélectionner le moteur électrique approprié pour assurer le mouvement de la table mobile. La tâche critique à effectuer consiste à déplacer la table mobile de masse m_T d'un point P_0 de coordonnées $(x_0 = 0, y_0 = 0)$ à un point P_1 de coordonnées $(x_1 = 0.02m, y_1 = 0)$ puis revenir vers le point P_0 en un temps $T = 1s$ (Figure 2.35) suivant le profil de vitesse décrit par la Figure 2.36. Pour sélectionner le moteur adéquat à cette situation, on va suivre les étapes décrites à la section 2.3.6.

Étape 1 : Adéquation

L'analyse du modèle Bond Graph direct de la Figure 2.37 indique :

- qu'il existe une ligne de puissance entrée/sortie (c.-à-d. un chemin d'acheminement de l'énergie) entre l'élément Bond Graph portant la variable d'entrée $u(t)$ et celui portant la variable de sortie $v_T(t)$.

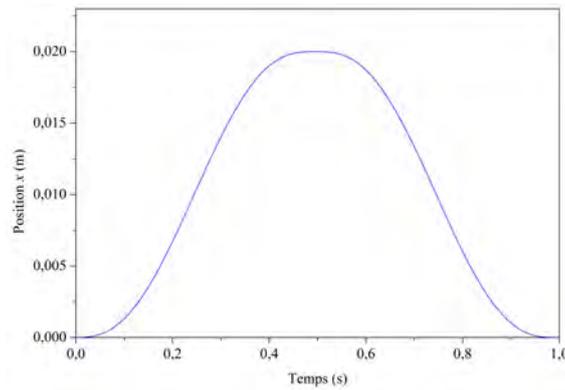


Figure 2.35: Trajectoire de la position de la table imposée par le cahier des charges .

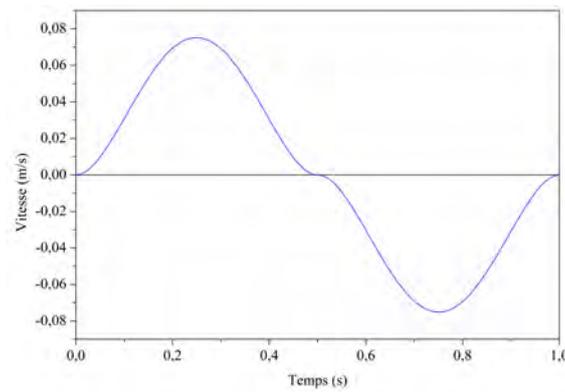


Figure 2.36: Profil de vitesse spécifié.

- qu'il existe un chemin causal entré/sorti (c.-à-d. une relation analytique) entre la variable d'entrée $u(t)$ et la variable de sortie $v_T(t)$.

Le modèle est donc structurellement inversible [91] par rapport au couple de variables ($u(t)$ et $v_T(t)$). Il est aussi inversible par rapport au couple de variables (τ_m et $v_T(t)$). Connaissant la vitesse de déplacement de la table ($v_T(t)$), on peut calculer le couple moteur (τ_m) que doit fournir l'actionneur pour répondre aux critères de dimensionnement établis par le cahier des charges.

Étape 2 : Spécification

L'objectif de l'étape de spécification est de calculer le couple $\tau_m(t)$ et la vitesse angulaire $\omega_m(t)$ requis en sortie du moteur électrique tout en respectant les contraintes de vitesse établies par le cahier des charges (Figures 2.35 et 2.36). Pour ce faire, il convient donc d'inverser le modèle précédent (Figure

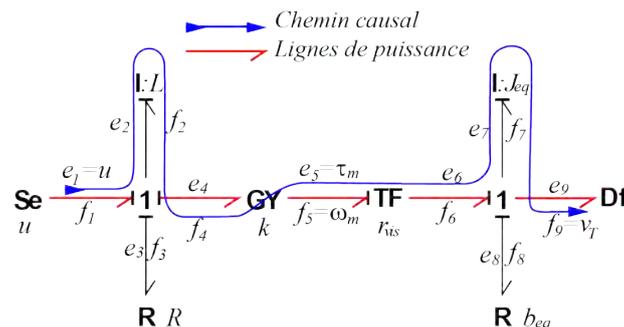


Figure 2.37: Dimensionnement du moteur électrique : étape d'adéquation.

2.37) par rapport au couple de variables $(\tau_m$ et $v_T(t))$ tel qu'il est montré à la Figure 2.38.

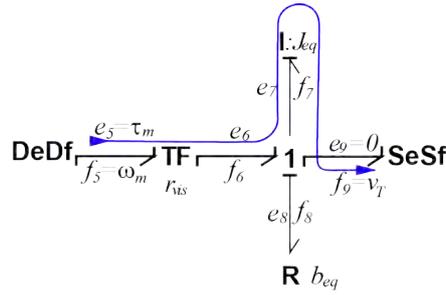


Figure 2.38: Dimensionnement du moteur électrique : étape de spécification.

Du Bond Graph inverse de la Figure 2.38, les équations pour calculer le couple et la vitesse angulaire du moteur sont obtenues, à partir de la jonction 1 on peut écrire (Équation 2.17),

$$\begin{cases} e_6 = e_7 + e_8 + e_9 \\ f_6 = f_7 = f_8 = f_9 \end{cases} \quad (2.17)$$

Comme $f_9 = v_T$, $e_9 = 0$ (capteur supposé idéal), $e_8 = b_{eq}f_8 = b_{eq}v_T$ et $e_7 = J_{eq} \frac{df_7}{dt} = J_{eq} \frac{dv_T}{dt}$ alors :

$$\begin{cases} e_6 = b_{eq}v_T + J_{eq} \frac{dv_T}{dt} \\ f_6 = v_T \end{cases} \quad (2.18)$$

à partir de l'élément TF on a :

$$\begin{cases} \tau_m = e_5 = r_{vis}e_6 \\ \omega_m = f_5 = \frac{v_T}{r_{vis}} \end{cases} \quad (2.19)$$

Le schéma bloc du calcul est montré dans la Figure 2.39.

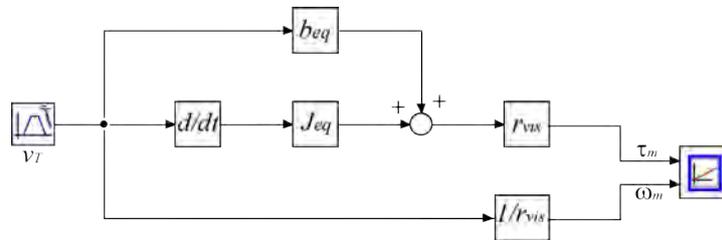


Figure 2.39: Schéma bloc du calcul de τ_m et ω_m .

La Figure 2.40 montre les spécifications en sortie du moteur électrique obtenues après la simulation numérique.

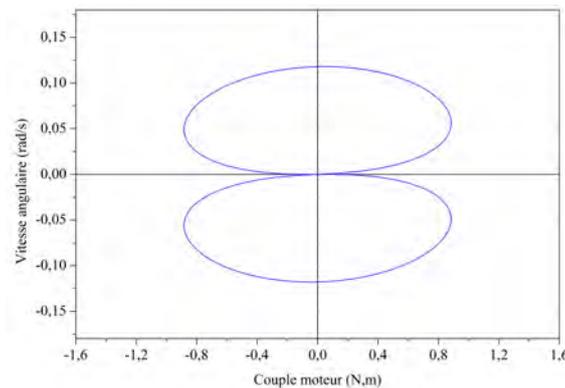


Figure 2.40: Domaines de fonctionnement requis en sortie du moteur électrique.

Étape 3 : Sélection

En comparant les spécifications précédemment calculées (Figure 2.40) aux gabarits de sortie de deux moteurs électriques à courant continu de 25A et de 45A (Figure 2.41), on peut alors constater que le moteur de 25A est clairement sous-dimensionné pour satisfaire le cahier des charges. Le moteur sélectionné est donc celui de 45A.

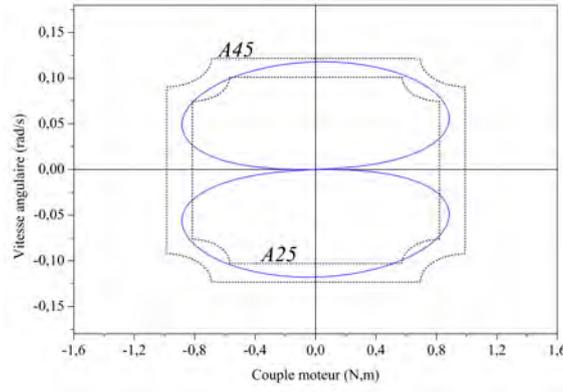


Figure 2.41: Dimensionnement du moteur électrique : étape de sélection.

Étape 4 : Validation

Enfin, pour valider le choix du moteur de 45A, il convient de le modéliser et d'inverser à nouveau le modèle, cette fois-ci par rapport au couple de variables $(v_T(t), u(t))$ où $u(t)$ est la tension d'entrée du moteur (Figure 2.42). À partir de l'élément *GY* et la jonction 1 de la partie électrique, on peut écrire (Équations 2.20 et 2.21) :

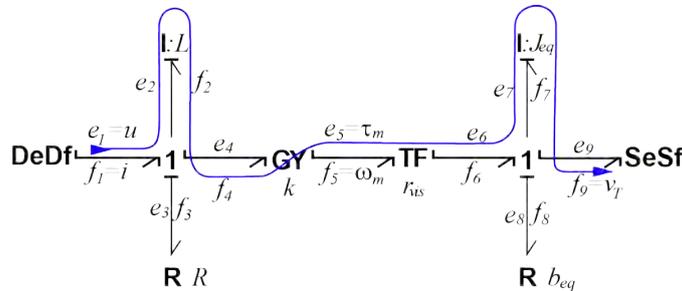


Figure 2.42: Dimensionnement du moteur électrique : étape de validation.

$$\begin{cases} e_4 = kf_5 \\ f_4 = \frac{e_5}{k} \end{cases} \quad (2.20)$$

$$\begin{cases} e_1 = e_2 + e_3 + e_4 \\ f_1 = f_2 = f_3 = f_4 \end{cases} \quad (2.21)$$

Avec $f_1 = i(t)$, $e_1 = u(t)$, $e_2 = L \frac{di(t)}{dt}$ et $e_3 = Ri(t)$, donc:

$$\begin{cases} u(t) = L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + e_4 \\ i(t) = f_4 \end{cases} \quad (2.22)$$

Le schéma bloc du calcul (Figure 2.43) de ce nouveau modèle permet de calculer les évolutions de la tension $u(t)$ et de l'intensité de courant $i(t)$ requises en entrée du moteur d'assistance pour satisfaire le cahier des charges. La Figure 2.44 montre les performances attendues pour la partie électrique du moteur pour le profil de la vitesse imposé.

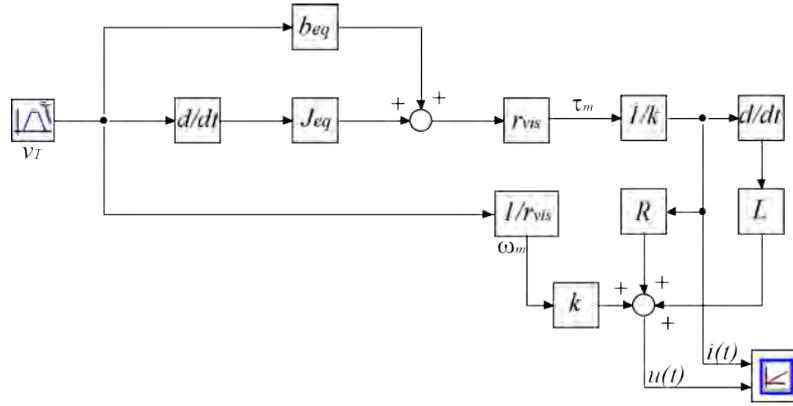


Figure 2.43: Schéma bloc du calcul de $u(t)$ et $i(t)$..

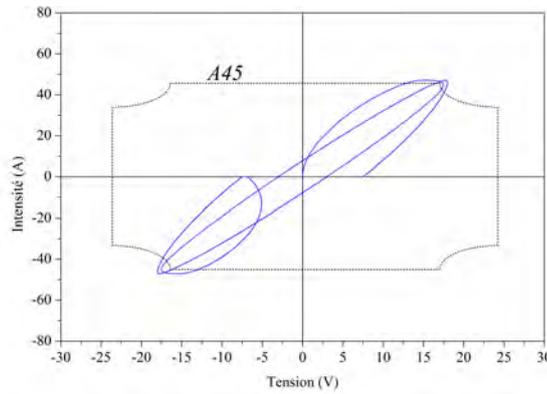


Figure 2.44: Domaines de fonctionnement requis en entrée du moteur électrique.

En superposant les performances calculées avec le gabarit d'entrée du moteur de 45A, on peut alors déduire que celui-ci est globalement validé.

c- Commande

Pour commander un système par le Bond Graph Inverse, il faut suivre les étapes suivantes :

1. Choisir la grandeur du système à commander (pour notre exemple on va contrôler la position de la table mobile), cette grandeur devient une source d'entrée pour le Bond Graph Inverse.
2. Commencer à construire le Bond Graph Inverse, en se basant sur le principe de la bicausalité.
3. Extraire les équations bicausal à partir du Bond Graph Inverse et les exploiter pour développer la commande du système en boucle ouverte.
4. Pour établir la loi de commande de boucle fermée, on impose la dynamique de l'erreur.

Pour notre exemple (Figure 2.28), l'objectif est de contrôler la position x de la table mobile, du Bond Graph Inverse de la Figure 2.42, les équations de la commande en boucle ouverte sont obtenues.

$$\begin{cases} e_6 = e_7 + e_8 + e_9 \\ f_6 = f_7 = f_8 = f_9 \end{cases} \quad (2.23)$$

Comme $f_9 = v_T$, $e_9 = 0$ (capteur supposé idéal), $e_8 = b_{eq}f_8 = b_{eq}v_T$ et $e_7 = J_{eq} \frac{df_7}{dt} = J_{eq} \frac{dv_T}{dt}$ alors.

$$\begin{cases} e_6 = b_{eq}v_T + J_{eq} \frac{dv_T}{dt} \\ f_6 = v_T = \dot{x} \end{cases} \quad (2.24)$$

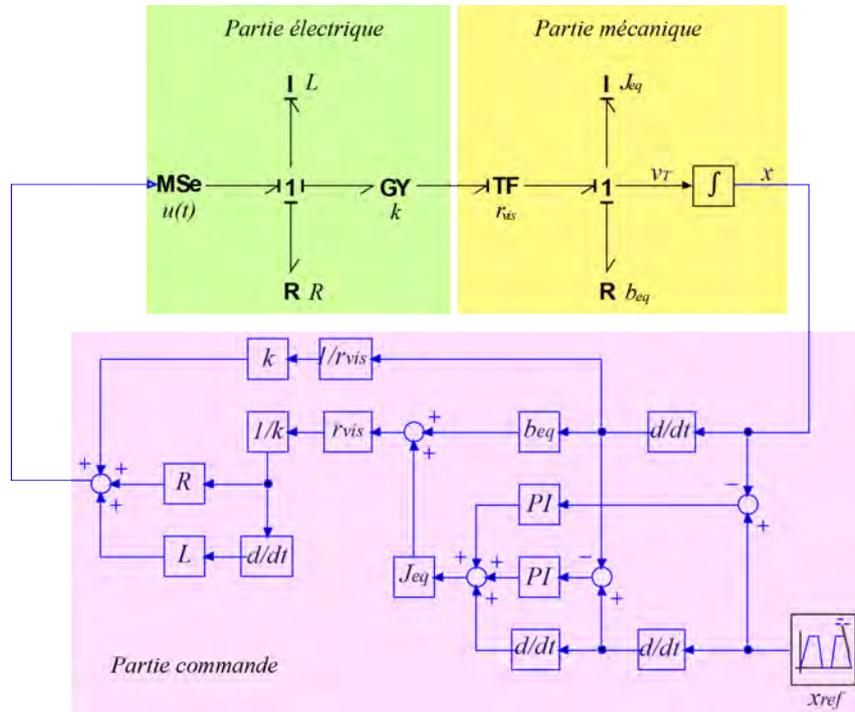


Figure 2.46: Modèle bond graph du système et sa commande.

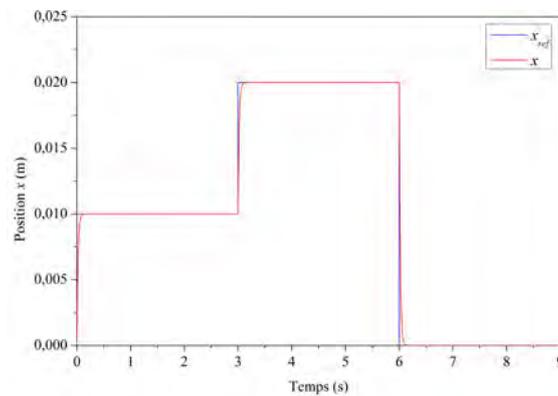


Figure 2.47: Position de la table mobile.

2.4 Conclusion

L'objectif de ce chapitre était tout d'abord de présenter les principaux outils de modélisation multiphysique existants utilisés dans la phase de pré-dimensionnement de systèmes mécatroniques. Il en ressort que les outils de modélisation structurels nous semblent les plus pertinents pour la modélisation de systèmes mécatroniques complexes comme la turbine éolienne étudiée. En effet, ils permettent une approche de modélisation modulaire d'un système.

Parmi ces outils de modélisation structurels, l'outil qui a été retenu est le Bond Graph. Il permet une modélisation modulaire de systèmes de différents domaines de la physique à l'aide d'un même modèle. De plus, il permet de mener d'autres objectifs complémentaires comme, par exemple, dimensionnement/conception par modèle inverse, synthèse structurelle, synthèse paramétrique, synthèse de tolérance, synthèse de commande et l'optimisation dynamique.

La démarche de construction de modèles Bond Graph a été présentée. Le Bond Graph peut s'avérer être une réponse performante dans la modélisation, le dimensionnement et la commande de systèmes mécatroniques.

Enfin, nous avons montré, à l'aide d'un exemple électromécanique simple, les qualités et les avantages de l'utilisation de l'outil Bond Graph.

Contribution du Bond Graph à la modélisation et la commande des systèmes de production éoliennes

3.1 Introduction

Après avoir défini les systèmes mécatroniques complexes et présentés leur démarche classique de conception (Chapitre 1), puis montré pourquoi les outils de modélisation structurels comme le Bond Graph pouvaient être de bons candidats pour faciliter leur modélisation (Chapitre 2). L'objectif de ce chapitre est de montrer quelques atouts de l'approche Bond Graph, en contribuant à la modélisation et à la commande de systèmes de production d'énergie éolienne. Nous présenterons un modèle non linéaire de ce système à base du Bond Graph. Un modèle mécatronique plus détaillé sera l'objet du chapitre suivant. L'intérêt de ce chapitre est de montrer la différence entre la modélisation avec une méthode classique et en utilisant la méthode de Bond Graph, pour la modélisation et la commande d'une turbine éolienne à vitesse variable et à pas variable de $5MW$, utilisant une génératrice asynchrone équipée d'une boîte de vitesse. La modélisation de l'éolienne doit comprendre un modèle aérodynamique de l'éolienne, un modèle de l'entraînement mécanique, un modèle simplifié de la machine asynchrone et un modèle de système de calage. De plus, le présent chapitre présente une comparaison entre des stratégies de contrôle classique en utilisant un contrôleur conventionnel PID et par le concept de bicausalité du Bond Graph.

3.2 Modélisation de la turbine

Le dispositif étudié est constitué d'une turbine éolienne à vitesse variable et à pas variable comprenant quatre grands blocs fonctionnels; à savoir : les sous-systèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques et le système d'orientation des pales (Figure 3.1).

Le sous-système aérodynamique est consacré à la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique utile. Le sous-système mécanique peut être divisé en deux blocs fonctionnels. Le premier est le dispositif d'entraînement, qui est destiné de transférer le couple aérodynamique du côté rotor en un couple mécanique entraînant le générateur électrique. Il englobe le rotor, le multiplicateur de vitesse et les parties mécaniques du générateur. Le second est composé par la tour qui soutient le rotor et les autres dispositifs en hauteur tout en résistant à la force de poussée. Le sous-système électrique qui effectue la conversion de l'énergie mécanique de l'arbre du générateur en énergie électrique. Enfin, le sous-système d'asservissement de calage est constitué d'un dispositif hydraulique ou électromécanique, qui fait tourner les pales autour de leurs axes longitudinaux, en modifiant ainsi l'angle de calage.

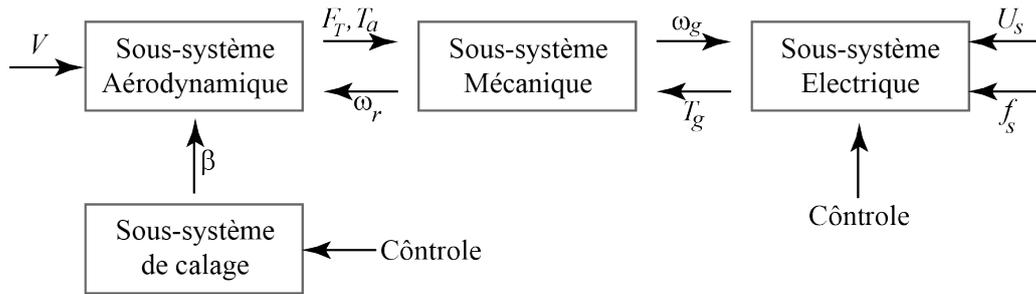


Figure 3.1: Sous-systèmes de la turbine éolienne.

3.2.1 Modèle aérodynamique

La partie aérodynamique de la turbine décrit les forces développées sur une turbine éolienne par un écoulement d'air. Les deux grandes approches pour déduire des modèles aérodynamiques pour les éoliennes sont : *la théorie du disque ou théorie de l'écoulement axial et la théorie de l'élément de la pale* [92, 93].

La première théorie explique de manière simple le processus d'extraction de l'énergie du vent. En outre, elle fournit un modèle théorique supérieur lié à l'efficacité de conversion d'énergie, en supposant l'air incompressible. La deuxième théorie exprime les forces produites par l'écoulement d'air sur un élément de pale. Cette théorie est plus appropriée pour expliquer certains phénomènes aérodynamiques tels que le décrochage, ainsi que pour étudier les charges aérodynamiques. Dans ce chapitre le modèle aérodynamique est basé sur la première théorie, la deuxième théorie sera détaillée dans le chapitre suivant.

a- Puissance aérodynamique

La puissance aérodynamique P_a extraite par le rotor en fonction du facteur de puissance C_p [94] est donnée par l'Équation 3.1 :

$$P_a = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (3.1)$$

Le paramètre adimensionnel C_p , exprime la capacité de la turbine à extraire de l'énergie du vent. Ce paramètre caractéristique de l'éolienne est fonction de la vitesse spécifique λ (Équation 3.2) et de l'angle du calage β et est appelé coefficient de puissance, avec :

$$\lambda = \frac{R\omega_r}{v} \quad (3.2)$$

où $R\omega_r$ désigne la vitesse tangentielle du bout de la pale, R étant le rayon de l'aire balayée par le rotor (Figure 3.2).

- v , la vitesse du vent.
- $S = \pi R^2$, l'aire de la surface balayée par le rotor.
- ρ , la masse volumique de l'air.

b- Coefficient de puissance aérodynamique

Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ dépend du nombre de pales du rotor et de leurs formes géométriques et aérodynamiques (longueur, profil des sections) [95]. Celles-ci sont conçues en fonction des caractéristiques du site, de la puissance nominale souhaitée, du type de régulation (en pitch ou par décrochage) et du type de fonctionnement (à vitesse fixe ou variable).

Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ peut être obtenu, par exemple, par des essais en soufflerie. Il se présente sous la forme d'une fonction non linéaire de λ et β , décrite par une famille de polynômes

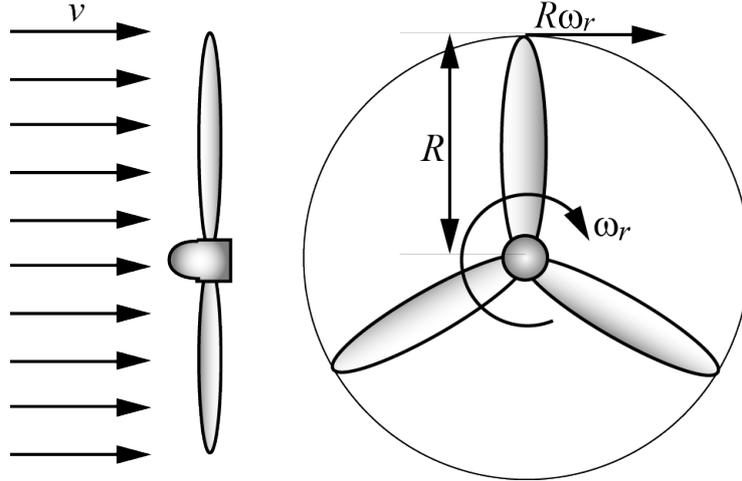


Figure 3.2: Vitesse spécifique du rotor.

ou des splines [96]. La limite supérieure théorique du coefficient de puissance $C_{p,max}$ est fournie par la loi de Betz [97].

$$C_{p,max} = \frac{16}{27} \approx 0.5926 \quad (3.3)$$

En pratique, les frottements et la force de traînée réduisent cette valeur à environ 0.5 pour les éoliennes de grande taille. On peut aussi calculer une expression analytique de $C_p(\lambda)$ pour différentes valeurs de β . Une seule interpolation par rapport à β est alors suffisante. Pour un angle de calage β donné, l'expression analytique généralement utilisée est une régression polynomiale [98] :

$$C_p(\lambda) = \sum_{i=0}^n a_i \lambda^i \quad (3.4)$$

Heier [99] propose expression de $C_p(\lambda, \beta)$ plus complexe (Équation 3.5):

$$C_p(\beta, \lambda) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (3.5)$$

où

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^2 + 1}} \quad (3.6)$$

Avec: $c_1 = 0.5176$, $c_2 = 116$, $c_3 = 0.4$, $c_4 = 5$, $c_5 = 21$, et $c_6 = 0.0068$.

Le coefficient de puissance de l'éolienne considérée dans cette étude est donné par l'Équation 3.5. La figure 3.3 présente la variation de ce coefficient en fonction de λ et de l'angle β .

c- Couple aérodynamique et force de poussée

L'énergie cinétique du vent capturée par la turbine se transforme en énergie mécanique qui se traduit par un couple moteur T_a faisant tourner le rotor à une vitesse ω_r et une force de poussée F_T agir sur la structure de la turbine. En termes de puissance, on peut écrire :

$$P_a = T_a \omega_r \quad (3.7)$$

ou encore

$$T_a = \frac{P_a}{\omega_r} \quad (3.8)$$

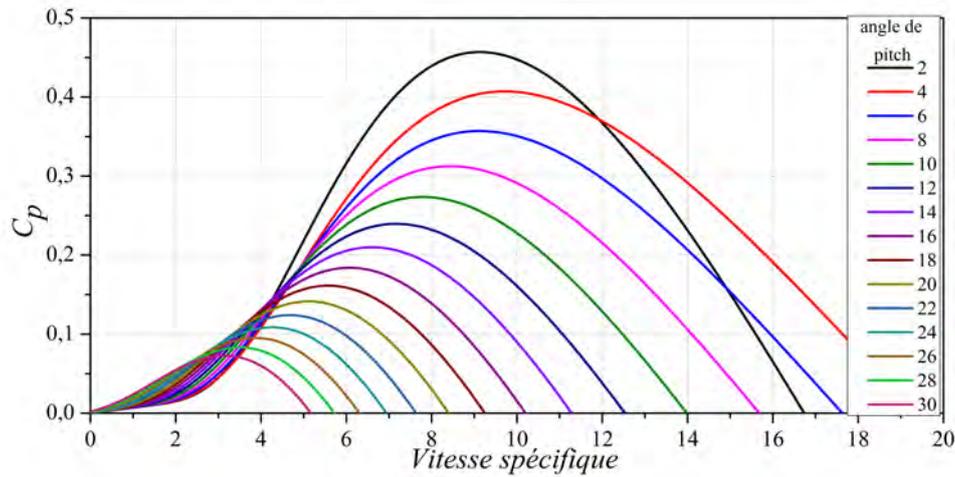


Figure 3.3: Coefficient de puissance.

En substituant l'expression (3.1) dans (3.8) et en tenant compte de (3.2), on peut réécrire l'expression de couple aérodynamique sous la forme :

$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 C_q(\lambda, \beta) \quad (3.9)$$

où :

$C_q(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda}$ est le coefficient du couple aérodynamique.

Ce coefficient est utile pour estimer la valeur du couple en différents points de fonctionnement. Comme C_p , il dépend de la vitesse du vent v , de la vitesse de rotation de la turbine ω_r et de l'angle de calage β . Il est aussi exprimé, le plus souvent, en fonction de λ et β .

La force de poussée est donnée par l'expression suivant :

$$F_T = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^2 C_T(\lambda, \beta) \quad (3.10)$$

avec $C_T(\lambda, \beta)$ le coefficient de la force de poussée.

Le calcul du couple aérodynamique et de la force de poussée est réalisé à l'aide du modèle Matlab/Simulink présenté à la Figure 3.4.

d- Modèle Bond Graph du sous-système aérodynamique

Dans la partie aérodynamique, nous avons besoin de trouver un moyen pour convertir la vitesse du vent en couple et en une force de poussée, à savoir transformer un flux en un effort. Cela se fait au moyen d'un élément gyrateur moduler MGY du Bond Graph. Nous utilisons le couple et la force de poussée données dans les équations 3.9 et 3.11. Dans ce cas, la transformation dépend de trois variables à savoir : la vitesse v du vent, l'angle de calage β et la vitesse de rotation du rotor ω_r . La Figure 3.5 montre le modèle Bond de Graph de la partie aérodynamique.

3.2.2 Modèle mécanique

Le modèle mécanique peut être divisé en deux blocs fonctionnels. Le premier est le dispositif d'entraînement, qui sert de transférer le couple et la vitesse de rotation lente du côté rotor en une vitesse de rotation rapide du côté générateur. Ceci permet d'utiliser des générateurs de taille plus compacte [100]. On peut lui associer un modèle à deux masses ou un modèle à une masse uniquement. Le modèle à deux masses pour le dispositif d'entraînement est très employé dans la littérature [100, 101, 102]. Son schéma est illustré sur la Figure 3.6. Le second est composé de la tour pour soutenir le rotor et des

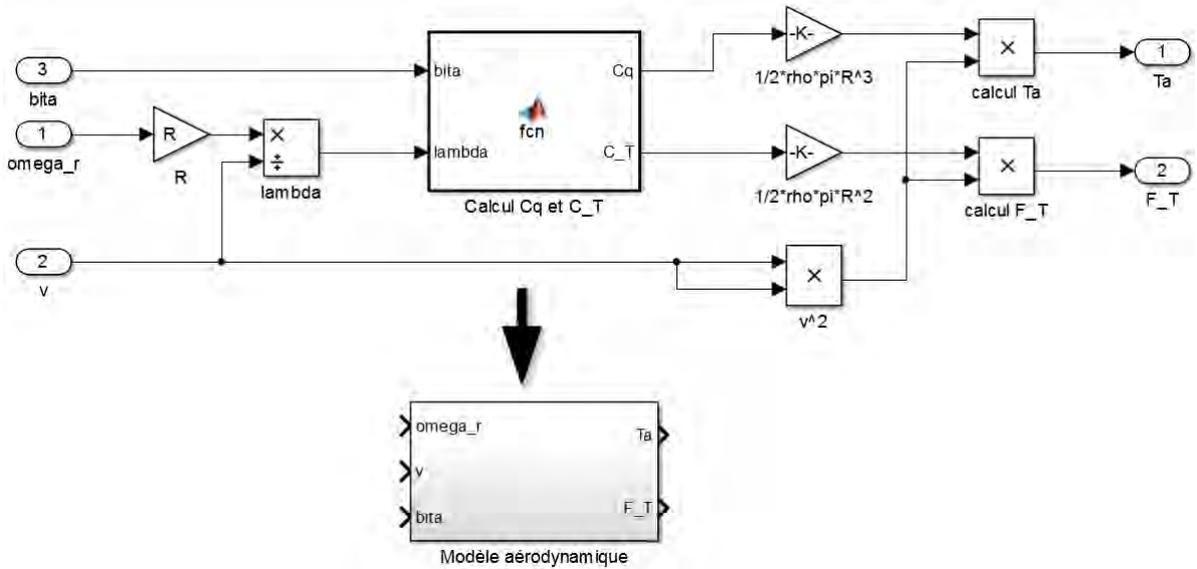


Figure 3.4: Modèle Matlab/Simulink du sous-système aérodynamique.

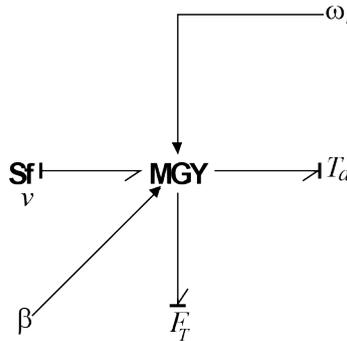


Figure 3.5: Modèle bond graph du sous-système aérodynamique.

autres dispositifs en hauteur tout en résistant à la force de poussée (Figure 3.6). Tous les paramètres sont présentés dans le Tableau 3.1.

Les hypothèses relatives à ce modèle sont :

- Les modes flexibles sont localisés dans l'élément flexible de l'arbre lent et l'arbre rapide.
- Les modes flexibles des pales sont supposés suffisamment élevés pour être négligés.

Les inerties du multiplicateur et de l'arbre lent sont intégrées à celle du rotor. L'ensemble est représenté par J_r .

À cause de sa taille immense, le rotor peut être modélisé par une seule masse. En effet, l'inertie de la turbine est sensiblement égale à celle des pales. Selon [103], l'inertie du moyeu peut être négligée, car elle représente 1% de l'inertie totale de la turbine. L'inertie de l'arbre rapide associé à la génératrice est représentée par J_g . Les torsions et l'amortissement des pales, moyeu, multiplicateur et de l'arbre lent sont respectivement regroupées dans un coefficient d'élasticité global K_{ms} et un coefficient d'amortissement global D_{ms} représenté sur l'arbre lent [104, 105]. Le torsion et l'amortissement de l'arbre rapide est représenté par K_{hs} et D_{hs} . La torsion des axes de la turbine, en termes de constante de raideur, peut être calculée analytiquement connaissant sa forme géométrique et les propriétés des matériaux la constituant grâce aux lois de la résistance des matériaux [106]. Les frottements visqueux sur les roulements du dispositif d'entraînement sont pris en compte par les coefficients D_r et D_g . La masse de la tour est représentée par m_t , sa rigidité et son amortissement sont représentés par K_t et D_t .

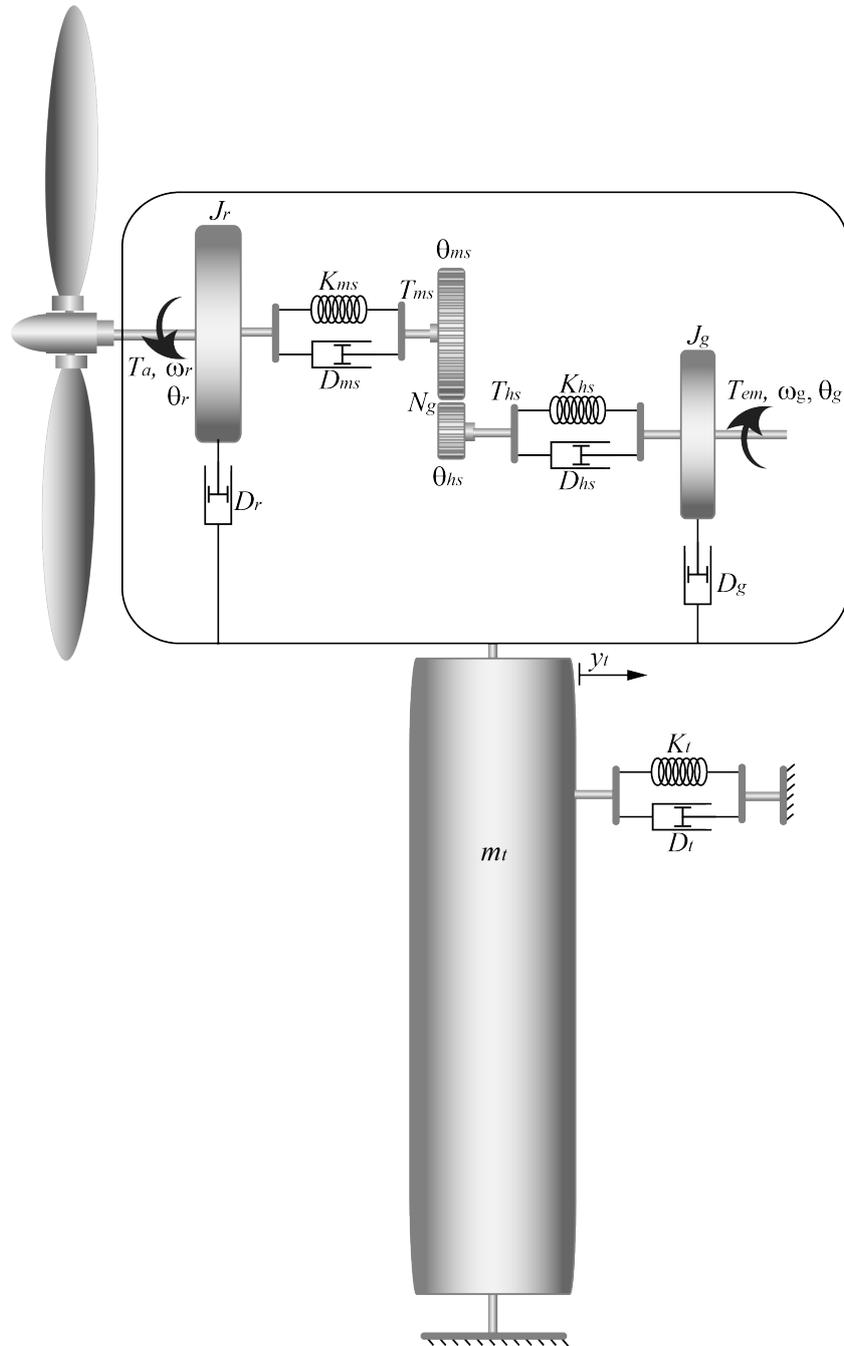


Figure 3.6: Schéma technologique du sous-système mécanique.

a- Modèle mathématique du sous-système mécanique

Un système mécanique de complexité arbitraire peut être décrit par l'équation de mouvement (Équation 3.12):

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = Q \quad (3.11)$$

où M , C et K sont les matrices de masse, d'amortissement et de rigidité et Q est le vecteur des forces agissant sur le système. Pour les structures mécaniques ayant quelques degrés de liberté, l'équation de Lagrange (Équation 3.12) propose une procédure systématique pour obtenir des modèles mathématiques.

Liste des symboles	
J_r	inertie des masses du côté du rotor ($kg.m^2$)
J_g	inertie des masses du côté du générateur ($kg.m^2$)
m_t	masse de la tour (kg)
K_{ms}	coefficient de torsion sur l'arbre lent ($N.m/rad$)
K_{hs}	coefficient de torsion sur l'arbre rapide ($N.m/rad$)
K_t	coefficient de rigidité de la tour (N/m)
D_{ms}	coefficient d'amortissement sur l'arbre lent ($N.m.s/rad$)
D_{hs}	coefficient d'amortissement sur l'arbre rapide ($N.m.s/rad$)
D_r	coefficient de frottements externes du rotor ($N.m.s/rad$)
D_g	coefficient de frottements externes du générateur ($N.m.s/rad$)
D_t	coefficient d'amortissement de la tour ($N.s/m$)
N_g	rapport de transmission du multiplicateur
ω_r	vitesse angulaire du rotor (rad/s)
ω_g	vitesse angulaire du générateur (rad/s)
y_t	déplacement de la tour (m)
T_a	couple aérodynamique ($N.m$)
T_{em}	couple électromécanique de la génératrice ($N.m$)
T_{ms}	couple de l'arbre lent ($N.m$)
T_{hs}	couple de l'arbre rapide ($N.m$)

Tableau 3.1: Paramètres du système à deux masses et de la tour

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial E_c}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_c}{\partial q_i} + \frac{\partial E_d}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial E_p}{\partial q_i} = Q_i \quad (3.12)$$

E_c , E_d et E_p désignent respectivement l'énergie cinétique, dissipée et potentielle, q_i est la coordonnée généralisée et Q_i représente la force généralisée.

Pour le modèle de la Figure 3.6, les coordonnées généralisées suivantes (Équation 3.13) peuvent être adoptées :

$$q = [\theta_r \ \theta_{ms} \ \theta_g \ y_t]^T \quad (3.13)$$

où θ_r , θ_{ms} et θ_g sont respectivement les positions angulaires du rotor, l'arbre primaire du multiplicateur et le générateur, y_t est le déplacement axial de la nacelle. D'après ces définitions, les termes d'énergie E_c , E_d et E_p peuvent être écrits comme :

$$E_c = \frac{1}{2} J_r \omega_r^2 + \frac{1}{2} J_g \omega_g^2 + \frac{1}{2} m_t \dot{y}_t^2 \quad (3.14)$$

$$E_d = \frac{1}{2} D_r \omega_r^2 + \frac{1}{2} D_{ms} (\omega_r - \omega_{ms})^2 + \frac{1}{2} D_{hs} (\omega_g - N_g \omega_{ms})^2 + \frac{1}{2} D_g \omega_g^2 + \frac{1}{2} D_t \dot{y}_t^2 \quad (3.15)$$

$$E_p = \frac{1}{2} K_{ms} (\theta_r - \theta_{ms})^2 + \frac{1}{2} K_{hs} (\theta_g - N_g \theta_{ms})^2 + \frac{1}{2} K_t y_t^2 \quad (3.16)$$

Le vecteur des forces généralisées est :

$$Q = [T_a \ 0 \ -T_{em} \ F_T] \quad (3.17)$$

Ensuite, le remplacement des équations (3.13), (3.14) et (3.16) dans l'équation de Lagrange (Équation 3.12), donne l'équation du mouvement (Équation 3.11) avec les matrices :

$$M = \begin{bmatrix} J_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_t \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

$$C = \begin{bmatrix} D_r + D_{ms} & -D_{ms} & 0 & 0 \\ -D_{ms} & D_{ms} + N_g D_{hs} & -N_g D_{hs} & 0 \\ 0 & -N_g D_{hs} & D_{hs} + D_g & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_t \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$K = \begin{bmatrix} K_{ms} & -K_{ms} & 0 & 0 \\ -K_{ms} & K_{ms} + N_g K_{hs} & -N_g K_{hs} & 0 \\ 0 & -N_g K_{hs} & K_{hs} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_t \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

Après quelques manipulations, le modèle d'état du sous-système mécanique est :

$$\begin{cases} \dot{x} = \mathbf{A}x + \mathbf{B}u \\ y = \mathbf{C}x + \mathbf{D}u \end{cases} \quad (3.21)$$

où les vecteurs d'état, d'entrée et de sortie sont :

$$x = [q^T \ \dot{q}^T]^T \quad (3.22)$$

$$u = Q = [T_a \ 0 \ -T_{em} \ F_T]^T \quad (3.23)$$

$$y = \dot{q} = [\omega_r \ \omega_{ms} \ \omega_g \ \dot{y}_t]^T \quad (3.24)$$

et les matrices \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} et \mathbf{D} sont :

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0_{4 \times 4} & I_{4 \times 4} \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0_{4 \times 4} \\ M^{-1} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$\mathbf{C} = [0_{4 \times 4} \ I_{4 \times 4}] \quad (3.27)$$

$$\mathbf{D} = [0_4]^T \quad (3.28)$$

La résolution de cette équation d'état (Équation 3.21) est réalisée à l'aide du modèle Matlab/Simulink présenté à la Figure 3.7 :

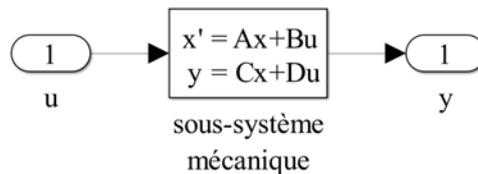


Figure 3.7: Modèle Matlab/Simulink du sous-système mécanique de la turbine éolienne.

b- Modèle Bond Graph du sous-système mécanique

Dans la modélisation par Bond Graph, le modèle peut être obtenu directement à partir du schéma technologique du système, sans passer par des calculs mathématiques, ce qui permet de faciliter la représentation du système et de minimiser les erreurs de modélisation.

La représentation Bond Graph du train d'entraînement est représentée sur la Figure 3.8. Le modèle se compose de deux jonction-1 et deux jonction-0. La jonction-1 la plus à gauche relie, l'inertie du rotor (J_r) modélisé par l'élément I et le frottement externe du rotor (D_r) modélisé par l'élément R , est décrite la vitesse de rotation du rotor (ω_r), et la jonction-1 la plus à droite reliée, l'inertie du rotor du générateur (J_g) modélisé par l'élément I et le frottement externe du générateur (D_g) modélisé par l'élément R , est décrite la vitesse de rotation du générateur (ω_g). Étant donné qu'il existe une dynamique entre l'inertie du rotor et l'inertie du générateur, ils ne possèdent pas la même vitesse. Ceci est réalisé par la jonction-0 sur l'arbre principal et secondaire. Les éléments R (D_{ms} , D_{hs}) et les éléments C (K_{ms} , K_{hs}) relient par la jonction-1 décrivent respectivement l'amortissement et la rigidité dans l'arbre rotor et générateur, le multiplicateur de vitesses est modélisé par un simple transformateur (élément TF) où N_g est le rapport de transformation.

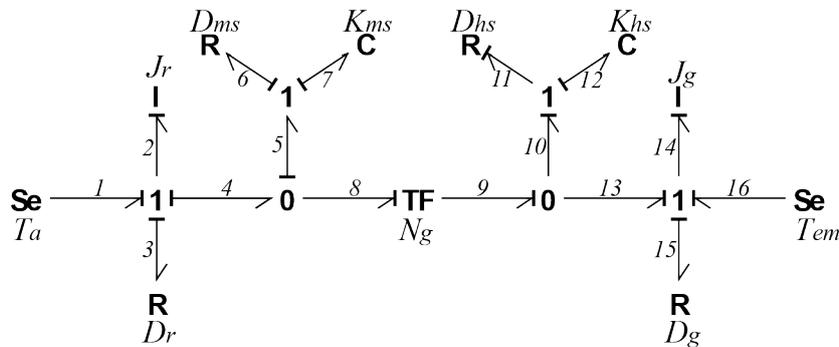


Figure 3.8: Modèle bond graph du train d'entraînement mécanique de la turbine éolienne.

Le modèle Bond Graph de la tour est présenté dans la Figure 3.9, où sa masse m_t est représentée par l'élément I , son amortissement D_t est représenté par l'élément R , l'élément C représente sa rigidité et la force de poussée F_T , agissant sur la tour, est modélisée par un élément source Se calculé à la partie aérodynamique.

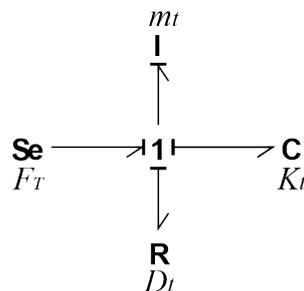


Figure 3.9: Modèle bond graph de la tour de la turbine éolienne.

3.2.3 Modèle électrique

Les générateurs électriques sont généralement des machines électriques les plus populaires dans l'industrie éolienne pour convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Pour cette étude, on supposera que la machine électrique est modélisée par un modèle simple de premier ordre (un modèle plus détaillé de la machine électrique sera présenté dans le chapitre suivant), et en conséquence, le couple électromagnétique T_{em} développé à tout instant peut être décrite comme suit :

$$T_{em} = \frac{1}{\tau s + 1} T_{em-ref} \quad (3.29)$$

Où T_{em-ref} est le couple électromagnétique de référence et τ est la constante de temps du générateur. T_{em-ref} est utilisé en tant que paramètre de commande pour régler le couple électromagnétique du générateur T_{em} , sa valeur est déterminée par l'intermédiaire d'un contrôleur approprié.

3.2.4 Modèle du système de calage

Le vent est une grandeur stochastique, de nature très fluctuante. Par conséquent, la qualité de l'énergie produite par une éolienne devient un problème important. Plusieurs techniques de contrôle ont été conçues pour améliorer la qualité de l'électricité produite par les éoliennes. Le contrôle de l'angle des pales est la méthode de contrôle de puissance la plus efficace, en particulier pour les éoliennes à vitesse variable. C'est un procédé utile pour la régulation de puissance en dessus de la vitesse nominale du vent en changeant l'angle de calage du rotor des pales. L'actionneur qui entraîne la pale autour de son axe longitudinal peut être un système hydraulique ou électromécanique. Dans cette étude, on va considérer le système électromécanique pour ces avantages la rapidité et la précision. Ce système électromécanique est constitué d'un sous-système électronique d'asservissement qui commande le moteur électrique. Ce moteur est relié à une boîte de vitesses qui entraîne à son tour la pale à travers un système d'engrenage à pignons et couronne dentée (Figure 3.10). Il existe de nombreuses possibilités pour modéliser le moteur électrique, en fonction de son type, avec différents niveaux de complexité et de précision. Dans notre modèle, nous utilisons un moteur à courant continu pour contrôler l'angle de calage. La Figure 3.10 montre également le circuit équivalent du moteur à courant continu dans lequel u est la source de tension, la bobine de l'induit est représentée par une résistance R et une inductance L en série.

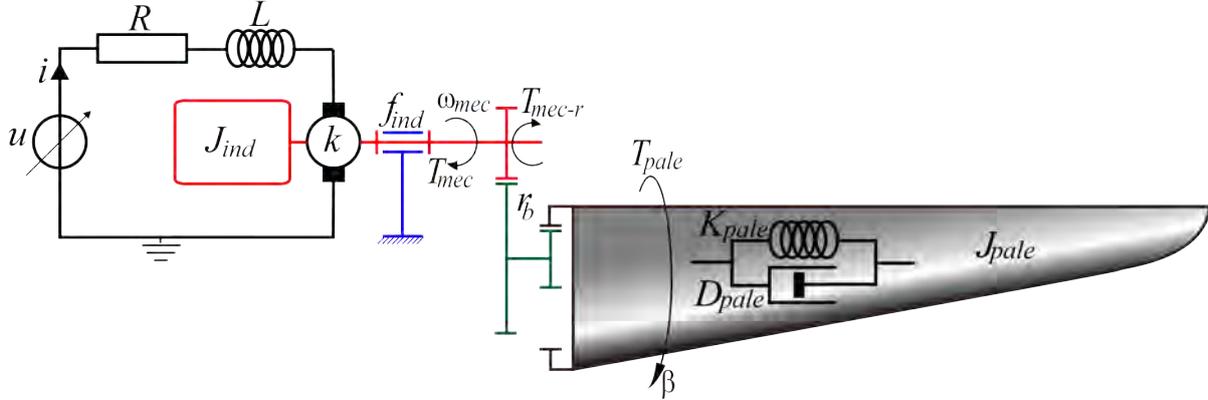


Figure 3.10: schéma technologique du système de calage.

a- Modèle mathématique du sous-système du calage

Le couple généré par le moteur à courant continu peut être représenté comme suit :

$$T_{mec} = k_t i \quad (3.30)$$

Où i est le courant électrique à travers le conducteur et k_t est la constante du couple. La force électromotrice e_{fem} est directement proportionnelle à la vitesse de rotation angulaire ω_{mec} par :

$$e_{fem} = k_{fem} \omega_{mec} \quad (3.31)$$

Avec k_{fem} est la constante de la force électromotrice.

Si on néglige les pertes dans le champ magnétique, on peut écrire : $k_t = k_{fem} = k$ qui satisfait $T_{mec} \omega_{mec} = e_{fem} i$. La partie mécanique du système de calage est composée par : l'inertie (J_{ind}) et le

frottement externe (f_{ind}) du rotor du moteur électrique, le réducteur de vitesse (r_b), l'élasticité (K_{pale} , D_{pale}) et l'inertie de la pale (J_{pale}). Le modèle mathématique mis en jeu est (Équations 3.32-3.36) :

$$L \frac{di}{dt} + Ri + e_{fem} = u \quad (3.32)$$

$$e_{fem} = k\omega_{mec} \text{ et } T_{mec} = ki \quad (3.33)$$

$$J_{ind} \frac{d\omega_{mec}}{dt} + f_{ind}\omega_{mec} = T_{mec} - T_{mec-r} \quad (3.34)$$

$$r_b = \frac{\dot{\beta}}{\omega_{mec}} = \frac{T_{mec-r}}{T_{pale}} \quad (3.35)$$

$$J_{pale} \frac{d\dot{\beta}}{dt} + D_{pale}\dot{\beta} + K_{pale}\beta = T_{pale} \quad (3.36)$$

On peut rassembler les équations 3.34, 3.35 et 3.36 dans une équation (Équation 3.37) définie par :

$$\left(\frac{J_{ind}}{r_b^2} + J_{pale}\right) \frac{d\dot{\beta}}{dt} + \left(\frac{f_{ind}}{r_b^2} + D_{pale}\right) \dot{\beta} + K_{pale}\beta = \frac{T_{mec}}{r_b} \quad (3.37)$$

Le schéma bloc du calcul est présenté sur la Figure 3.11.

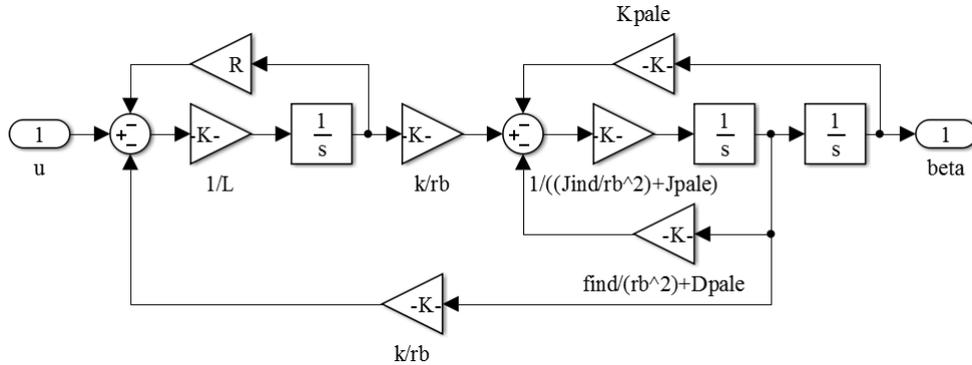


Figure 3.11: Modèle Matlab/Simulink du sous-système de calage.

b- Modèle Bond Graph du sous-système du calage

Le modèle Bond Graph du système de calage présenté sur la Figure 3.12 est tiré directement du schéma technologique de la Figure 3.10, où la tension d'alimentation u est modélisée par une source de tension modulée MSe , la résistance de la bobine R est représentée par un élément R , l'inductance du moteur L par un élément I , la transformation électromécanique par un gyrateur (GY) de paramètre k . La partie mécanique comprend tous les composants mécaniques du système de calage : le rotor du moteur électrique J_{ind} est représenté par un élément I , le frottement externe du rotor (f_{ind}) est représenté par un élément R , les éléments de transmission (boîte de vitesses + pignons et couronne dentée) sont représentés par un élément TF de paramètre r_b . Les comportements dynamiques présentés dans la pale sont modélisés par un élément R (D_{pale}) et un élément C (K_{pale}). L'inertie de la pale J_{pale} est représentée par un élément I .

D'après la Figure 3.12 on peut constater un problème de causalité au niveau de la jonction 1 la plus à droite, on peut corriger ce problème en ramenant les éléments I (J_{ind}) et R (f_{ind}) à coté des éléments I (J_{pale}) et R (D_{pale}). Le Bond Graph simplifié est représenté sur la Figure 3.13.

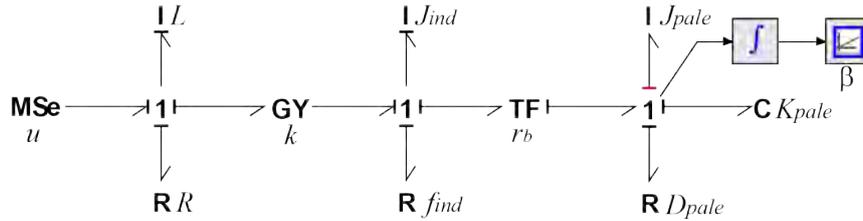


Figure 3.12: Modèle Bond Graph du sous-système de calage.

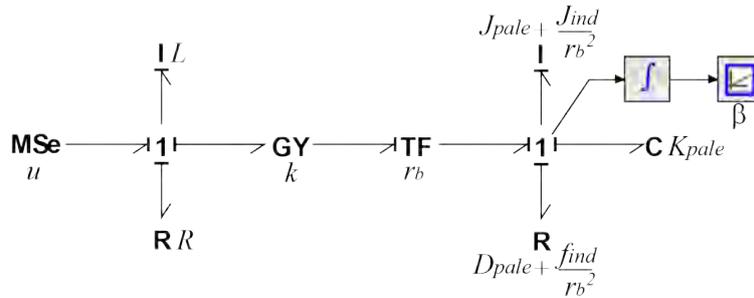


Figure 3.13: Modèle bond graph simplifié du sous-système de calage.

3.2.5 Modèle complet de la turbine éolienne

Le modèle global de l'éolienne est représenté sur les Figures 3.14 et 3.15. La Figure 3.14 représente le modèle Matlab/Simulink du système et la Figure 3.15 représente le modèle Bond Graph du système. Les entrées du système sont : la tension d'alimentation du moteur électrique du système de calage, la vitesse du vent et le couple électromagnétique de référence. Pour visualiser le comportement dynamique du système une simulation a été faite, nous avons mis la tension du moteur à zéro pour avoir un angle de calage égal à zéro, et nous avons fixée la vitesse du vent à une valeur constante égale à 12m/s et le couple électromagnétique de référence à une valeur de $-1KN.m$. La figure 3.16 montre le résultat de la simulation c'est-à-dire la vitesse de rotation du rotor de la turbine éolienne.

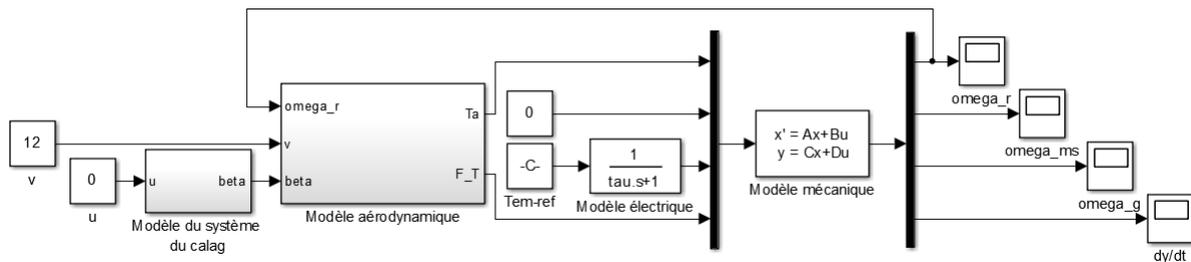


Figure 3.14: Modèle Matlab/Simulink complet de la turbine éolienne.

Les résultats de la simulation des deux approches sont les mêmes, ce qui confirme la validité du modèle Bond Graph, d'autant plus que la modélisation par Bond Graph a plusieurs avantages tels que : la simplicité d'implémentation des modèles que se soit le degré de liberté du système ce qui est très difficile par les approches mathématiques, permet une modélisation flexible et multidisciplinaire et permet l'implémentation des algorithmes des commandes qui sera l'objet des sections suivantes.

3.3 Stratégies de commande de la turbine éolienne

3.3.1 Zones de fonctionnement de la turbine éolienne

Une turbine éolienne fonctionne normalement dans plusieurs modes de fonctionnement en fonction de la vitesse du vent. Il peut être divisé en quatre zones représentées sur la Figure 3.17. Les vitesses du vent considérées comme des limites de ces zones sont : la vitesse de démarrage de la turbine v_{cut-in} ,

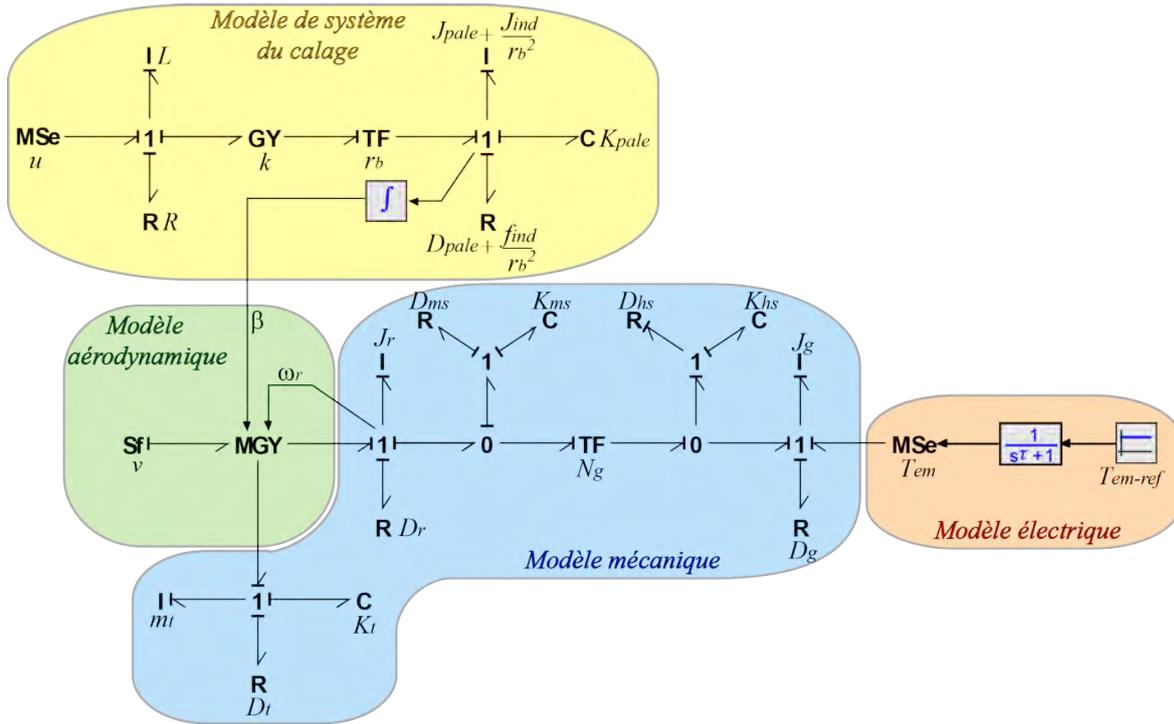


Figure 3.15: Modèle bond graph complet de la turbine éolienne.

la vitesse nominale du vent v_{nom} et la vitesse d'arrêt de la turbine $v_{cut-out}$ [107]. Les stratégies de commande dans ces régions sont sensiblement différentes.

- **Zone 1** ($v < v_{cut-in}$) : c'est la zone de démarrage de la machine. La vitesse du vent est trop faible (généralement entre $2.5m/s$ et $4m/s$ pour les éoliennes de forte puissance) pour fait fonctionner la turbine. L'unité de commande lance la commande d'arrêt et les systèmes de freinage arrêteront la turbine éolienne. Dans cette zone, l'angle de calage est généralement fixé à 90° .
- **Zone 2** ($v_{cut-in} < v < v_{nom}$) : appelée la zone à charge partielle, l'objectif de système de commande dans cette zone est d'extraire autant que possible le maximum de la puissance (*MPPT* : *Maximum Power Point Tracking*). Dans ce cas, le coefficient de puissance C_p doit être réglé à sa valeur maximale C_{p-max} . Cela se produit lorsque les deux variables β et λ sont maintenue, aussi proche, que possible de leurs valeurs optimales λ_{op} et β_{op} .
- **Zone 3** ($v_{nom} < v < v_{cut-out}$) : appelée la zone à pleine charge. Le but principal de système de commande dans cette région est de maintenir la puissance du générateur P_g autour de sa puissance nominale P_n , ceci est réalisé par la variation de l'angle de calage des pales. En conséquence, l'unité de commande doit générer l'angle de calage de référence approprié pour régler l'angle de calage des pales.
- **Zone 4** ($v_{cut-out} < v$) : La vitesse du vent est très importante, afin de protéger l'éolienne contre les dommages de fatigue et les contraintes mécaniques, l'éolienne doit être arrêtée. Ainsi, comme dans la zone 1, l'unité de commande lance la commande d'arrêt et les freins arrêteront la turbine éolienne. Dans ce cas, l'angle de calage est généralement fixé à 90° .

3.3.2 Stratégies de commande

Il existe généralement deux stratégies de commande suivant les zones de fonctionnement de l'éolienne :

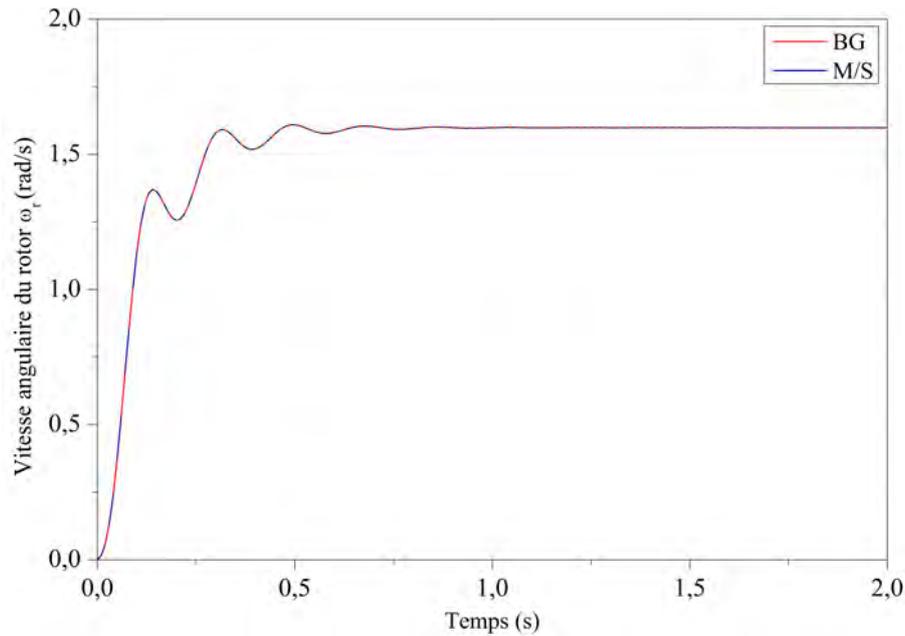


Figure 3.16: Comparaison des comportements dynamiques entre le modèle mathématique par Matlab/Simulink et le modèle bond graph, la vitesse de rotation du rotor de la turbine éolienne.

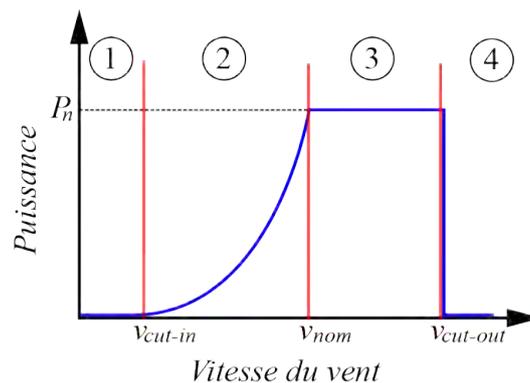


Figure 3.17: La caractéristique puissance, vitesse du vent typique d'une turbine éolienne.

a- Action à charge partielle (contrôle du couple électromagnétique)

Elle est utilisée dans la zone 2 du fonctionnement de l'éolienne. L'objectif est de capter le maximum d'énergie possible. Un rendement énergétique maximal est assuré par un coefficient aérodynamique maximal. Ce coefficient dépend de l'angle de calage β et la vitesse spécifique λ , c'est-à-dire du rapport entre la vitesse en bout de pale ($R\omega_r$) et la vitesse du vent (v). Pour optimiser la capture de l'énergie contenue dans le vent dans cette zone de fonctionnement, la commande de l'éolienne doit se faire de sorte que la vitesse de rotation du rotor ω_r s'adapte à la vitesse du vent v afin que la vitesse spécifique λ soit optimale [108], aussi l'angle de calage doit être régulée à sa valeur optimale, d'après la Figure 3.3 la valeur optimale λ est égale à 9 et celle de β égale à 2° .

Lorsque l'on trace les courbes donnant la puissance extraite en fonction de la vitesse de rotation de la génératrice, pour différentes vitesses de vent, on s'aperçoit qu'elles passent chacune par un unique maximum (Figure 3.18). Le but de ce contrôle est la recherche permanente de ce maximum. La technique utilisée pour la recherche de ce maximum retrouve sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking) [109, 110].

Il existe plusieurs techniques pour poursuivre le MPPT. Elles diffèrent selon le type d'informations dont elles ont besoin pour délivrer la référence de vitesse. Parmi ces techniques on peut trouver :

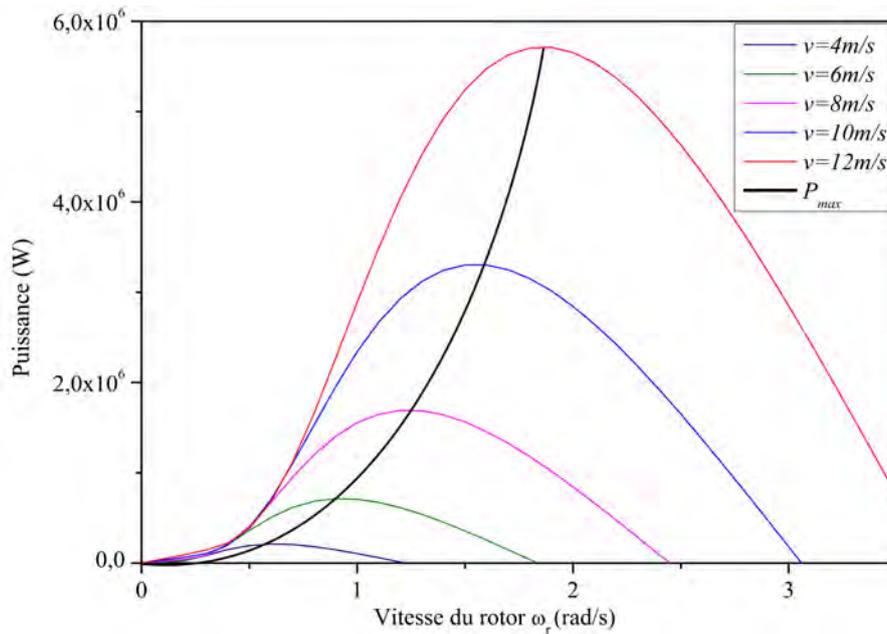


Figure 3.18: La caractéristique puissance, vitesse du rotor ω_r pour différentes valeurs de v .

- La méthode de commande de rapport de vitesse λ [109].
- La méthode de commande en puissance [109].
- La méthode du gradient [109].
- Les méthodes utilisant la logique floue [109].
- Les méthodes utilisant les réseaux de neurones [111].

Dans cette étude, on utilise la méthode de commande de rapport de vitesse λ . L'objectif prioritaire de cette commande est de maintenir λ à sa valeur optimale $\lambda = \lambda_{op}$. C'est pour cette valeur que le coefficient de puissance est égal à sa valeur maximale. Le but, comme pour les autres méthodes, est donc de rester constamment au point $(\lambda_{op}, C_{p-max})$. Il s'agit donc de faire varier la vitesse de rotation de la turbine ω_r en fonction des variations de la vitesse du vent v . Ceci permet de travailler continuellement avec un rendement aérodynamique optimal. C'est un des avantages principaux des éoliennes à vitesse variable par rapport à celles fonctionnant à vitesse fixe [109]. Pour chaque valeur de la vitesse du vent, on a :

$$\omega_{ref} = \frac{\lambda_{op} v}{R} \tag{3.38}$$

L'avantage de cette méthode est sa simplicité. Cependant, elle dépend fortement de la mesure de la vitesse de vent, c'est-à-dire de la qualité de l'image du vent fournie par l'anémomètre. De plus, la fiabilité de la méthode tient de la justesse de la courbe de la puissance maximale en fonction de la vitesse du vent [109].

b- Action en pleine charge (contrôle de l'angle de calage)

En charge totale, la vitesse du vent est supérieure à la vitesse nominale (zone 3). L'objectif principal dans cette zone consiste à limiter la puissance extraite à la valeur correspondante à la puissance nominale de la turbine en jouant sur l'angle de calage β des pales [108, 109]. Le mécanisme de positionnement des pales consiste à orienter les pales suivant un angle de référence (β_{ref} généré par l'unité de commande) par l'intermédiaire d'un système hydraulique ou électromécanique (section 1.2.4) . Le choix de cet angle provient en général d'une boucle externe visant à réguler, soit la vitesse de la turbine,

soit la puissance mécanique générée. Pour notre système, l'objectif est de contrôler la puissance générée.

Dans cette commande, la vitesse angulaire du rotor, la vitesse spécifique optimale λ_{op} et le coefficient de puissance maximale C_{p-max} sont respectivement :

$$\omega_{ref} = \omega_{nom} \quad (3.39)$$

$$\lambda_{op} = \frac{R\omega_{nom}}{v} \quad (3.40)$$

$$C_{p-max} = \frac{P_n}{\frac{1}{2}\rho\pi R^2 v^3} \quad (3.41)$$

Où P_n est la puissance nominale de la turbine. Par l'utilisation de l'expression de C_p (Équation 3.5) on peut construire un algorithme qui permet d'extraire les valeurs de β_{op} correspondant aux valeurs de C_{p-max} et λ_{op} , cependant :

$$\beta_{ref} = \beta_{op} \quad (3.42)$$

3.4 Mise en œuvre de la commande

Après avoir défini les stratégies de commande utilisées dans les turbine éolienne, l'objectif de cette section est la mise en œuvre de ces stratégies en utilisant deux techniques de commande celle issue de l'inverse du Bond Graph et celle de la régulation par le contrôleur PID. Les résultats de simulation de ces deux techniques seront présentés et discutés pour déterminer la technique la plus puissante.

Le contrôle de l'aéroturbine est assuré par deux boucles de régulation : la boucle de régulation de vitesse (contrôle de couple électromagnétique) et la boucle de régulation de puissance (contrôle de l'angle de calage de la pale). Ces deux boucles d'asservissement fonctionnent simultanément, mais une seule d'entre eux est dominante en fonction de la zone de fonctionnement. Lorsque la vitesse du vent est inférieure à la vitesse nominale de la turbine, l'angle de calage est maintenu constant à une valeur optimale β_{op} , tandis que la vitesse de rotation est ajustée par la boucle de régulation de vitesse pour extraire le maximum de la puissance du vent. Lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse nominale, la boucle de commande de l'angle de calage est utilisée pour réguler la puissance générée à sa valeur nominale.

3.4.1 Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse

Les techniques d'extraction du maximum de puissance consistent à déterminer la vitesse de la turbine qui permet d'obtenir le maximum de puissance générée. À partir de la jonction-1 la plus à droite de la Figure 3.8 on peut écrire :

$$e_{13} + e_{16} = e_{14} + e_{15} \quad (3.43)$$

Où : $e_{13} = T_{mg}$ est le couple mécanique au niveau de l'arbre de générateur, $e_{16} = -T_{em}$, $e_{14} = J_g \frac{d\omega_g}{dt}$ et $e_{15} = D_g \omega_g$. Donc on a :

$$J_g \frac{d\omega_g}{dt} = T_{mg} - D_g \omega_g - T_{em} \quad (3.44)$$

À partir de l'Équation 3.44 on peut voir que la vitesse mécanique est influencée par l'action des trois couples: un couple mécanique, un couple électromagnétique et un couple résistant. En regroupant l'action de ces trois couples, la vitesse mécanique n'est plus régie que par l'action de deux couples, à savoir le couple mécanique T_{mg} et le couple électromagnétique T_{em} . La structure de commande présentée dans cette thèse consiste à réguler le couple électromagnétique de manière à fixer la vitesse

à une référence. Afin de contrôler le couple électromagnétique, il est nécessaire de générer le couple électromagnétique de référence, ceci est obtenu en utilisant le contrôleur PI ou le modèle inversé du Bond Graph.

a- Commande par contrôleur PI

Selon l'équation fondamentale de la dynamique (Équation 3.44) permettant de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total appliqué au rotor, on peut réguler cette vitesse à une référence. Ceci est obtenu en utilisant un asservissement adéquat de la vitesse pour avoir un couple électromagnétique de référence. Pour faciliter la conception de contrôleur PI, nous avons proposé les hypothèses suivantes :

- Le couple électromagnétique développé par la machine est égal à sa valeur de référence, quelle que soit la puissance générée.

$$T_{em} = T_{em-ref} \quad (3.45)$$

- Les arbres primaire et secondaire sont supposés rigides.

Le couple électromagnétique de référence T_{em-ref} permettant d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à sa valeur de référence ω_{g-ref} est obtenu par la relation suivante :

$$T_{em-ref} = K_{PI}(\omega_{g-ref} - \omega_g) \quad (3.46)$$

Où K_{PI} est le régulateur de vitesse, ω_{g-ref} est la vitesse mécanique de référence de générateur. Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer (ω_{r-ref}) pour maximiser la puissance extraite. En prenant en compte le rapport de multiplicateur, on a donc :

$$\omega_{g-ref} = N_g \omega_{r-ref} \quad (3.47)$$

La vitesse de référence de la turbine ω_{r-ref} correspond à la valeur optimale du ratio de vitesse λ_{op} permettant d'obtenir la valeur maximale du C_p .

Le modèle mathématique simplifié de la turbine est :

$$\left(J_g + \frac{J_r}{N_g^2}\right) \frac{d\omega_g}{dt} + \left(D_g + \frac{D_r}{N_g^2}\right) \omega_g = T_{mec} - T_{em} \quad (3.48)$$

Avec $T_{mec} = \frac{T_a}{N_g}$. La fonction de transfert du système s'écrit comme :

$$F(s) = \frac{\omega_r(s)}{T_{mec} - T_{em}} = \frac{1}{J_T s + D_T} \quad (3.49)$$

Avec : $J_T = J_g + \frac{J_r}{N_g^2}$ et $D_T = D_g + \frac{D_r}{N_g^2}$.

Le schéma fonctionnel du contrôle de vitesse est donné par la Figure 3.19.

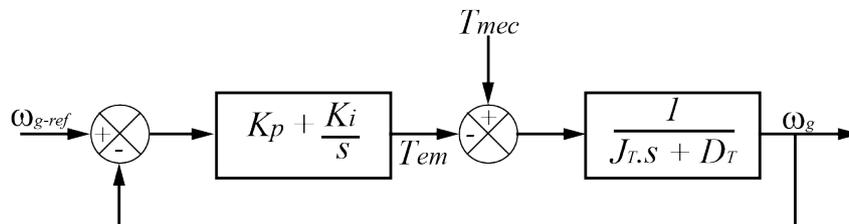


Figure 3.19: Régulation de la vitesse.

Le couple T_{mec} est présenté comme une perturbation, qu'on suppose nulle. La fonction de transfert de la vitesse en boucle fermée est donnée par :

$$F_{BF}(s) = \frac{K_p(s + \frac{K_i}{K_p})}{J_T.s^2 + (D_T + K_p).s + K_i} \quad (3.50)$$

Cette fonction possède une dynamique de 2^{eme} ordre, par identification à la forme canonique du 2^{eme} ordre l'équation caractéristique peut être représentée comme suit :

$$\frac{1}{\omega_0^2}.s^2 + (\frac{2\xi}{\omega_0}).s + 1 \quad (3.51)$$

Alors :

$$\frac{J_T}{K_i} = \frac{1}{\omega_0^2} \Rightarrow K_i = J_T\omega_0 \quad (3.52)$$

$$\frac{D_T + K_p}{K_i} = \frac{2\xi}{\omega_0} \Rightarrow K_p = \frac{2\xi K_i}{\omega_0} + D_T \quad (3.53)$$

Où ξ est le coefficient d'amortissement, ω_0 la pulsation propre du système. Pour obtenir la réponse optimale, on choisit le coefficient d'amortissement $\xi = 0.7$ [112, 113]. Le temps de réponse à 5% et la constante de temps du système à réguler est donné par [112, 114] :

$$t_r = \frac{3}{\xi\omega_0} \quad (3.54)$$

$$\tau = \frac{J_T}{D_T} \quad (3.55)$$

On prend le temps de réponse $t_r = \frac{\tau}{2}$ pour assurer la rapidité du correcteur.

Alors :

$$\omega_0 = \frac{3}{\xi(\tau/2)} \quad (3.56)$$

Enfin, on peut déduire les valeurs de K_i et K_p .

Remarque : On doit augmenter K_i pour atténuer l'action du couple mécanique T_{mec} .

b- Commande par le modèle Bond Graph inverse

Le modèle inverse correspond à une réorganisation des équations où les entrées deviennent des sorties et vice versa [115]. Le modèle inverse est créé en imposant à la fois l'effort et le flux provenant des éléments détecteur et recevant à la fois à la source. Cette procédure, où l'effort et le flux peuvent être imposés à la fois sur une bonde ne peut pas être fait par la causalité normale. C'est pourquoi la notion de bicausalité [116, 117] est introduite, afin d'envisager de nouveaux schémas de calculs physiquement irréalisables et pourtant mathématiquement possibles (c.-à-d. un sous-système S1 peut imposer à la fois un effort et un flux à un sous-système S2). La notation de bicausalité divise l'affectation de la causalité pour les deux variables de puissance, à savoir l'effort et le flux, en décomposant le trait causal en deux demi-trait causaux.

Dans le modèle inverse du Bond Graph, l'élément source (Se ou Sf) est remplacé par un élément détecteur de la source ($DeDf$) [118, 119] et l'élément détecteur (De ou Df) est remplacé par une source de détecteur ($SeSf$). La différence entre le détecteur de la source et la source de détecteur réside dans la causalité de l'élément : l'élément détecteur de source reçoit des informations des deux variables de puissance, alors que l'élément de source de détecteur fournit les deux.

Pour arriver au modèle inverse, la bicausalité se propage à partir de l'élément détecteur vers la source. La procédure d'affectation de la bicausalité est expliquée dans la section 2.3.5.

Avec le modèle inverse du Bond Graph, on peut construire la structure de la commande en boucle ouverte, puis en fixant la dynamique de l'erreur pour avoir une commande en boucle fermée.

Pour notre modèle, la variable d'entrée est le couple électromagnétique T_{em} et la variable de sortie est la vitesse de la turbine ω_r . L'analyse du modèle Bond Graph direct de la Figure 3.8 indique :

- qu'il existe une ligne de puissance entrée/sortie (c.-à-d. un chemin d'acheminement de l'énergie) entre l'élément Bond Graph portant la variable d'entrée T_{em} et celui portant la variable de sortie ω_r .
- qu'il existe un chemin causal entré/sorti (c.-à-d. une relation analytique) entre la variable d'entrée T_{em} et la variable de sortie ω_r .

Le modèle est donc structurellement inversible par rapport au couple de variables T_{em} et ω_r . L'objectif de la commande établi ici est de calculer le couple T_{em} requis pour fixer la vitesse de la turbine ω_r à une référence. Pour effectuer ce calcul, il convient donc d'inverser le modèle de la Figure 3.8 par rapport au couple de variables T_{em} et ω_r tel qu'il est montré à la Figure 3.20. À partir de cette figure, l'élément *SeSf* au bond numéro 0 impose à la fois l'effort et le flux et l'élément *DeDf* au bond de numéro 13 reçoit à la fois l'effort et le flux. On note que les sources fixes (celles qui ne sont pas parmi des entrées de la commande) sont conservées telles qu'elles sont, par exemple, *Se* : T_a au bond numéro 1.

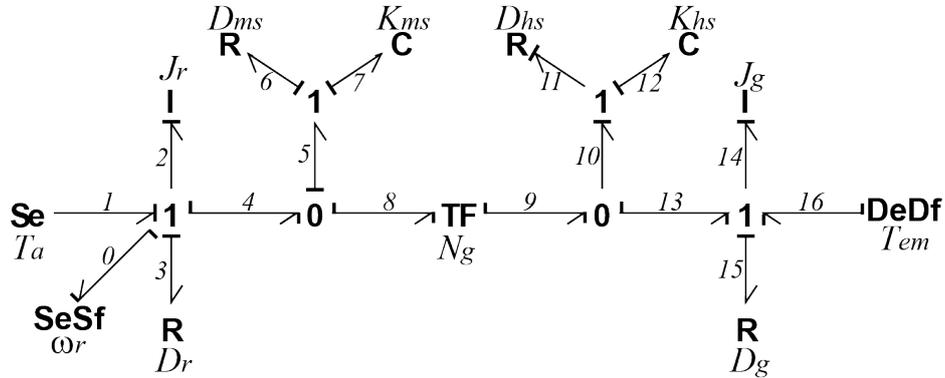


Figure 3.20: Modèle bond graph inverse.

De la Figure 3.20, on peut écrire les relations constitutives suivantes : à partir de la jonction-1 la plus à gauche (à savoir la jonction-1 placée entre les bonds 0, 1, 2, 3 et 4) on a :

$$\begin{cases} f_4 = f_0 = \omega_r \\ e_4 = e_1 - e_0 - e_2 - e_3 \end{cases} \quad (3.57)$$

Où $e_0 = 0$, $e_1 = T_a$, $e_2 = J_r \dot{\omega}_r$, $e_3 = D_r \omega_r$. Donc :

$$\begin{cases} f_4 = \omega_r \\ e_4 = T_a - J_r \dot{\omega}_r - D_r \omega_r \end{cases} \quad (3.58)$$

Pour établir la loi de contrôle en boucle fermée, la dynamique de l'erreur est définie par l'Équation 3.59 :

$$\dot{\epsilon} + k_1 \epsilon = 0 \quad (3.59)$$

Où k_1 représente le contrôleur à utiliser et $\epsilon = \omega_{r-ref} - \omega_r$, est l'erreur. L'expression 3.58 devient 3.60 comme suit :

$$\begin{cases} f_4 = \omega_r \\ e_4 = T_a - J_r \dot{\omega}_{r-ref} - J_r k_1 (\omega_{r-ref} - \omega_r) - D_r \omega_r \end{cases} \quad (3.60)$$

Pour la jonction-0 voisine, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} f_8 = f_4 - f_5 \\ e_8 = e_4 = e_5 \end{cases} \quad (3.61)$$

De la jonction-1 entre les bonds 5, 6 et 7, on a :

$$\begin{cases} f_5 = f_6 = f_7 \\ e_5 = e_6 + e_7 = D_{ms} f_6 + K_{ms} \int f_7 dt = D_{ms} f_6 + K_{ms} \int f_5 dt \end{cases} \quad (3.62)$$

Donc :

$$\begin{cases} f_5 = f_6 = f_7 \\ f_5 = \frac{1}{K_{ms}} (\dot{e}_4 - D_{ms} \dot{f}_5) \end{cases} \quad (3.63)$$

En procédant de la même manière, à partir de l'élément-TF, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} f_9 = N_g f_8 \\ e_9 = \frac{e_8}{N_g} = \frac{e_4}{N_g} \end{cases} \quad (3.64)$$

De la jonction-0 placée entre les bonds 9, 10 et 13.

$$\begin{cases} f_{13} = f_9 - f_{10} \\ e_{13} = e_9 = e_{13} \end{cases} \quad (3.65)$$

Avec

$$f_{10} = \frac{1}{K_{hs}} (\dot{e}_9 - D_{hs} \dot{f}_{10}) \quad (3.66)$$

Pour la jonction la plus à droite, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} f_{16} = f_{13} \\ e_{16} = -e_{13} + e_{14} + e_{15} \end{cases} \quad (3.67)$$

Avec : $e_{13} = e_9$, $e_{14} = J_g \dot{\omega}_g$, $e_{15} = D_g \omega_g$ et $e_{16} = -T_{em}$. Finalement on a :

$$\begin{cases} f_{16} = f_{13} \\ T_{em} = e_9 - J_g \dot{\omega}_g - D_g \omega_g \end{cases} \quad (3.68)$$

Pour générer le couple électromagnétique de référence, il faut inverser le modèle du générateur électrique comme :

$$T_{em-ref} = \tau \dot{T}_{em} + T_{em} \quad (3.69)$$

Nous pouvons construire le schéma bloc de la commande du modèle bicausal du Bond Graph à partir de ces équations (Figure 3.21).

D'après le schéma bloc de la Figure 3.21, les entrées du modèle direct deviennent des sorties de modèle de commande et vice versa. La sortie du modèle de commande est le couple électromagnétique de référence. La figure montre que le contrôleur proposé est un simple contrôleur PI à faibles gains.

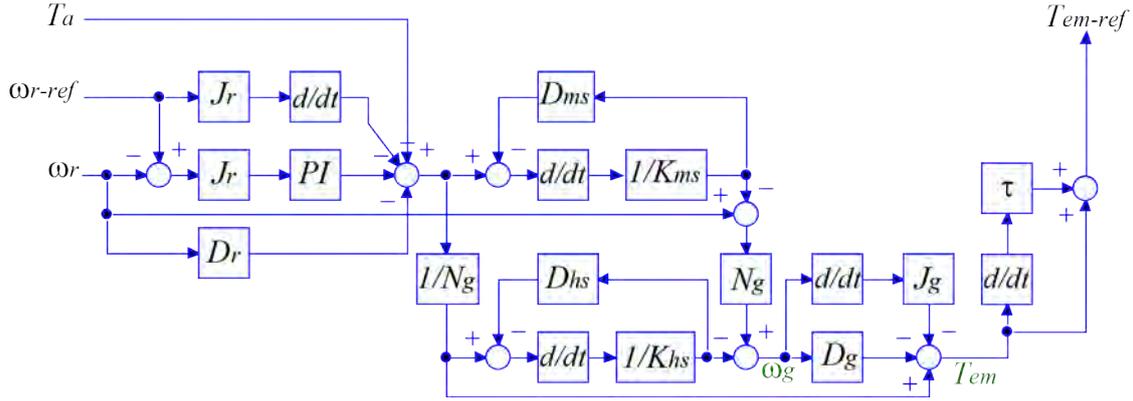


Figure 3.21: Schéma bloc de la commande issue de Bond Graph inverse.

3.4.2 Limitation de la puissance extraite avec asservissement de l'angle de calage

En dessus de la vitesse nominale du vent la puissance du générateur est fixée à sa valeur nominale. Pour assurer cette condition, un système de contrôle de l'angle de calage est introduit. L'angle d'orientation des pales doit être régulé de manière à maintenir constante la puissance électrique générée. La forme des pales est plus généralement, les caractéristiques de la turbine jouent un rôle primordial dans ce réglage de puissance.

Le modèle non-linéaire de la turbine rend complexe une conception analytique de ce régulateur. En outre, de très grandes différences (en raison de l'élasticité) peuvent apparaître d'une turbine à une autre. C'est ainsi qu'il est plus pratique d'utiliser une caractéristique expérimentale de l'angle de calage de la pale mesurée pour différentes vitesses du vent. La caractéristique de régulation inverse peut donner directement pour différentes vitesses du vent l'angle de calage correspondante (l'angle de référence), ceci est réalisé en utilisant l'algorithme donné dans la section 3.3.2 (Action en pleine charge (contrôle de l'angle de calage)) et le contrôleur doit fournir une tension adéquate au moteur pour faire tourner les pales à un angle désiré. Ceci est obtenu en utilisant le contrôleur PI ou le modèle inversé du Bond Graph du système de calage.

a- Commande par le contrôleur PI

L'objectif de ce contrôleur est de générer la tension d'alimentation du moteur électrique dans le but de réguler l'angle de la pale à un angle de référence comme :

$$u = K_{PI}(\beta_{ref} - \beta) \quad (3.70)$$

Où K_{PI} est le contrôleur proposé, β_{ref} est l'angle de calage de référence. La fonction de transfert de système du calage est présentée sous forme d'un schéma bloc de la Figure 3.22 (avec : $J_{eqv} = \frac{J_{ind}}{r_b^2} + J_{pale}$ et $D_{eqv} = \frac{D_{ind}}{r_b} + D_{pale}$) et la structure de la commande est présentée sur la Figure 3.23.

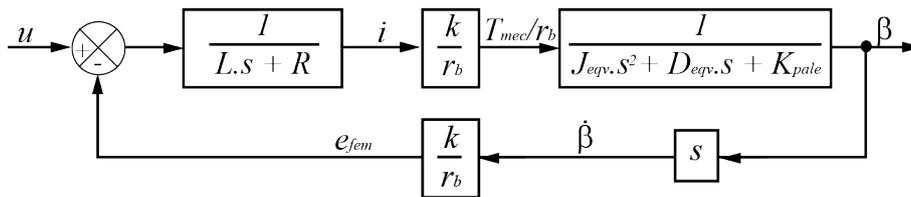


Figure 3.22: Fonction de transfert du système de calage.

La Fonction de transfert globale du système de la Figure 3.23 est de troisième ordre, dont le calcul analytique des paramètres du contrôleur est difficile. Donc, pour déterminer les paramètres du

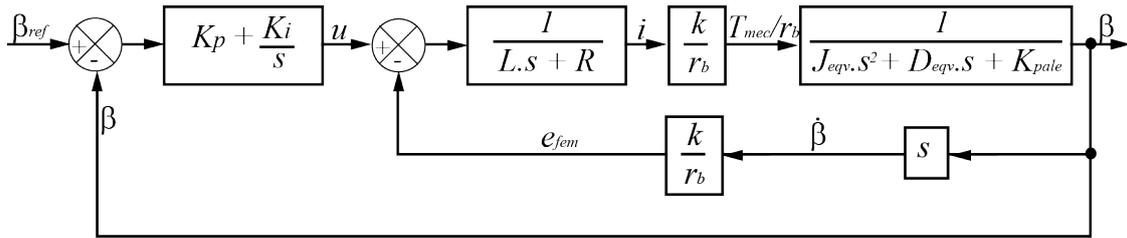


Figure 3.23: Schéma bloc de commande de l'angle de calage par le contrôleur PID.

contrôleur, on peut utiliser des méthodes d'estimation ou d'ajustages comme la méthode de Ziegler et Nichols [120] ou la méthode de Astrom et Hagglund [121], ou on peut utiliser les méthodes stochastiques comme les algorithmes PSO (Particle Swarm Optimization Algorithms) [122] ou les algorithmes génétiques [123]. Pour le calcul des paramètres de notre contrôleur, nous avons utilisé la méthode de Ziegler et Nichols (Annexe B)

b- Commande par le modèle Bond Graph inverse

Pour le modèle Bond Graph du système de calage de la Figure 3.13 la variable d'entrée est la tension électrique du moteur u et la variable de sortie est l'angle de calage β . L'analyse du modèle Bond Graph direct de la Figure 3.13 indique :

- qu'il existe une ligne de puissance entrée/sortie (c.-à-d. un chemin d'acheminement de l'énergie) entre l'élément bond graph portant la variable d'entrée u et celui portant la variable de sortie β .
- qu'il existe un chemin causal entré/sorti (c.-à-d. une relation analytique) entre la variable d'entrée u et la variable de sortie β .

Le modèle est donc structurellement inversible par rapport au couple de variables u et β . L'objectif de la commande établi ici est de calculer la tension du moteur électrique requis pour réguler l'angle de calage à une référence. Pour effectuer ce calcul, il convient donc d'inverser le modèle de la Figure 3.13 par rapport au couple de variables u et β tel qu'il est montré à la Figure 3.24. Comme il est mentionné auparavant, les éléments détecteur (Df) et source (Se) ont été remplacés respectivement par l'élément détecteur de source ($DeDf$) et l'élément source de détecteur ($SeSf$). L'élément $SeSf$ en bond numéro 10 impose à la fois l'effort et le flux, l'élément $DeDf$ au bond numéro 1 reçoit à la fois des informations de flux et d'effort.

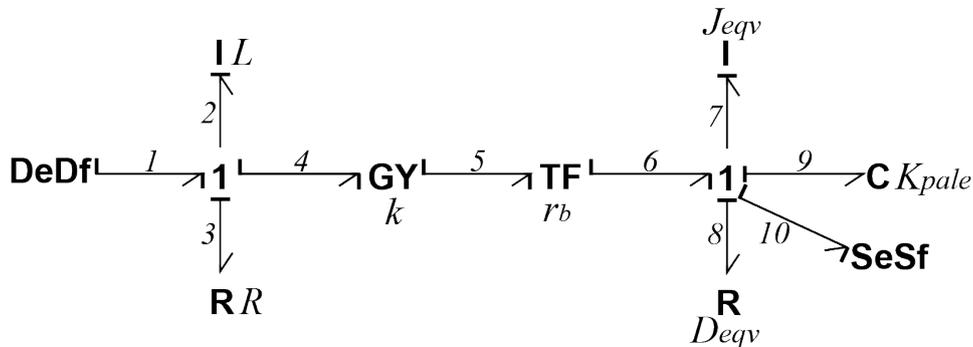


Figure 3.24: Modèle bond graph inverse du système de calage.

Comme il est défini précédemment dans la conception du contrôleur de couple, on peut conduire les équations à partir du Bond Graph inverse de la Figure 3.24.

À partir de la jonction-1 située entre les bonds 6, 7, 8, 9 et 10 on a :

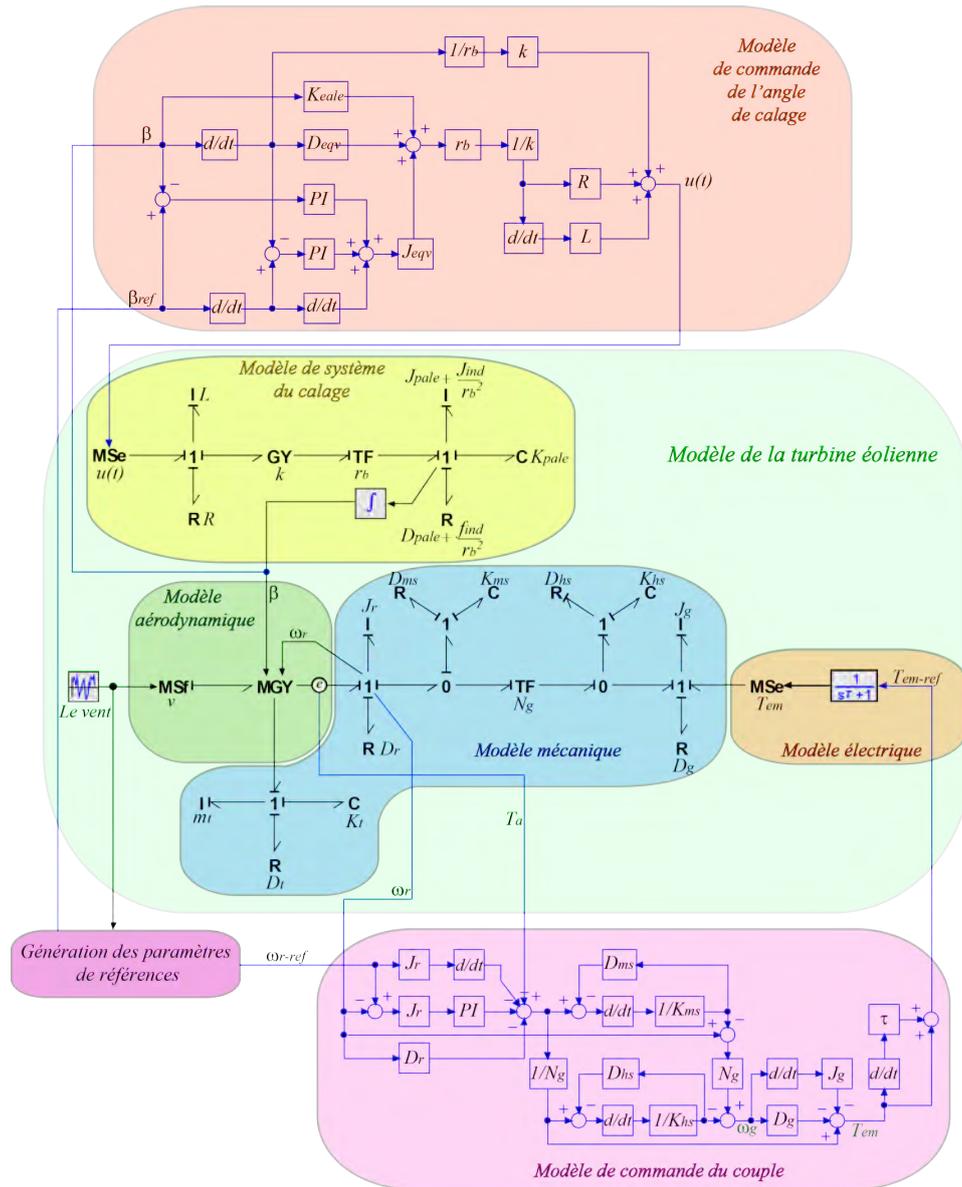


Figure 3.27: Modèle bond graph de la turbine éolienne et sa commande par le bond graph inverse.

3.32 montre la comparaison du couple du générateur pour les contrôleurs BMI et PID. Il peut être observé que le BMI produit un couple plus important par rapport à PID dans la région 2. La Figure 3.33 montre la variation de l'angle de calage β pour les deux contrôleurs PID et BGI, la variation de l'angle trouvé plus stable pour le BGI par rapport à PID. La Figure 3.34 montre le déplacement du sommet de la tour pour PID et BGI, il peut être observé que le déplacement de la tour dans IBG est inférieur à celle du régulateur PID.

Afin de créer les conditions appropriées pour comparer les deux méthodes, le profil de vitesse du vent représenté sur la Figure 3.35 avec une vitesse moyenne $12m/s$ est utilisé.

Comme on le voit sur la Figure 3.36, la vitesse du générateur reste autour de sa valeur nominale ($112,35rad/s$) dans la zone 3, elle est plus stable dans la régulation par le BGI que par le PID. La Figure 3.37 montre le couple du générateur. Afin d'augmenter la puissance du générateur, le couple du générateur, sa vitesse ou les deux doivent être augmentés. La Figures 3.37 montre que le couple dans BGI est plus élevé par rapport à celui du PID.

La puissance générée de la turbine éolienne représentée sur la Figure 3.38, atteint sa valeur nomi-

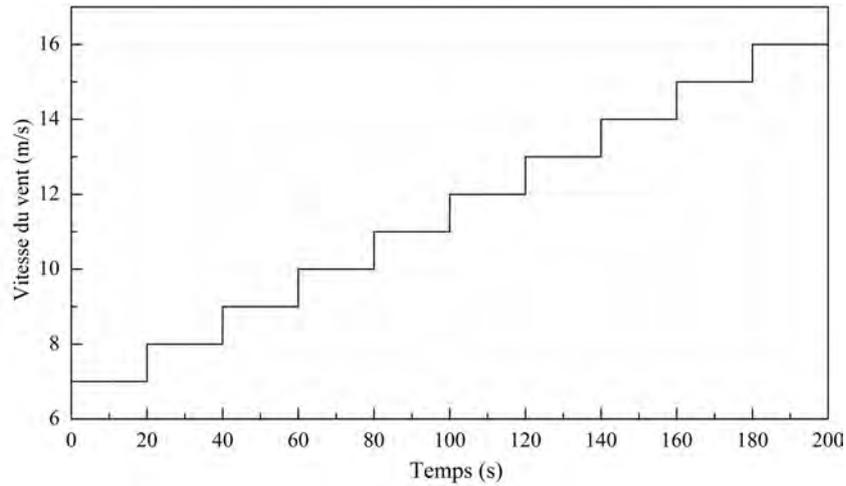


Figure 3.28: Vitesse du vent (profil de test).

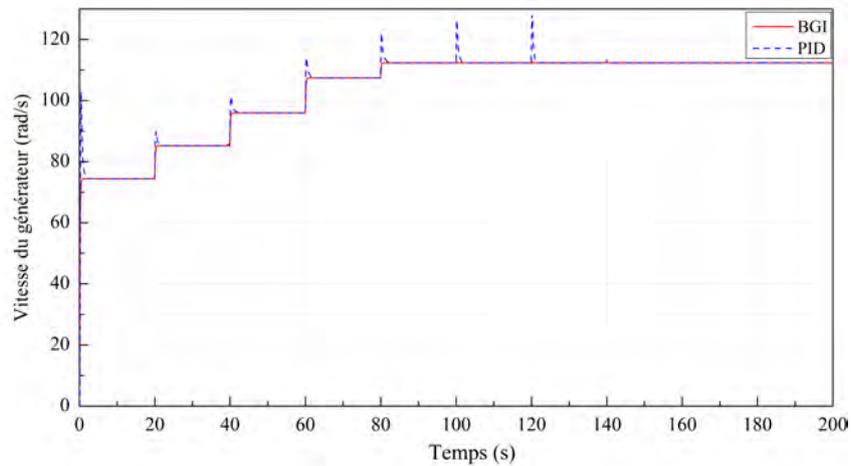


Figure 3.29: Vitesse du générateur (profil de test).

nale dans la zone 3 pour les deux contrôleurs. Les Figures 3.38 et 3.39 montrent que le BGI est capable de capter plus de puissance dans la zone 2 par rapport à l'autre contrôleur. À partir de la Figure 3.40, nous constatons que le système de calage peut suivre le vent turbulent au-dessus de la vitesse nominale pour les deux contrôleurs. Le déplacement de la tour dans BGI est inférieur à celle du régulateur PID comme indiqué sur la Figure 3.41.

Par conséquent, d'après les résultats de la simulation, la commande par le BGI a un rendement plus efficace pour les deux boucles de régulations en comparaison avec le contrôleur PID.

Les performances du système de contrôle sont également testées lors d'un vent turbulent avec une vitesse moyenne de 18m/s (Figure 3.42). La vitesse du générateur, le couple du générateur, la puissance générée, le coefficient de puissance, l'angle de calage et le déplacement de la tour sont présentés respectivement dans les Figures 3.43-3.48. Nous pouvons voir que même pour le vent très turbulent, toutes les variables de la turbine se comportent très bien dans le BGI que le PID.

À partir de ces trois simulations, nous constatons que par rapport aux stratégies de commande par le contrôleur PID, le BGI peut donner une performance plus efficace dans la production de l'énergie éolienne. Les contrôleurs conçus dans le présent document ont été testés en utilisant les logiciels *Matlab/Simulink* pour l'implémentation des schémas bloc et *20-sim* pour l'implémentation des modèles Bond Graph.

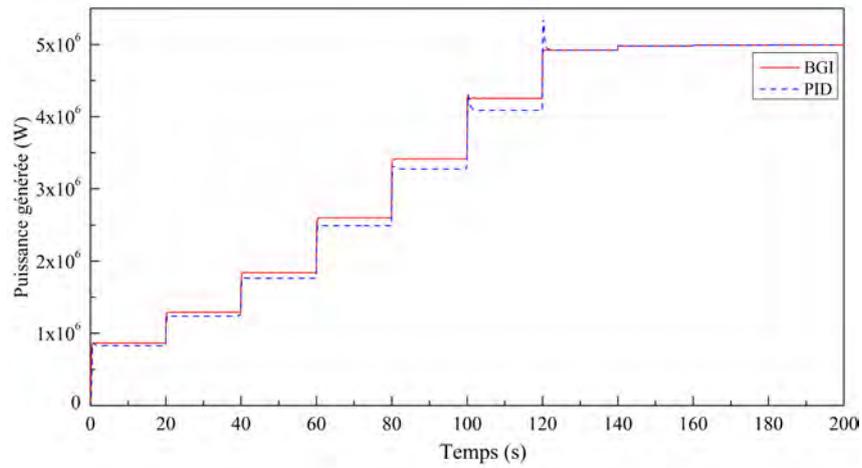


Figure 3.30: Puissance générée (profil de test).

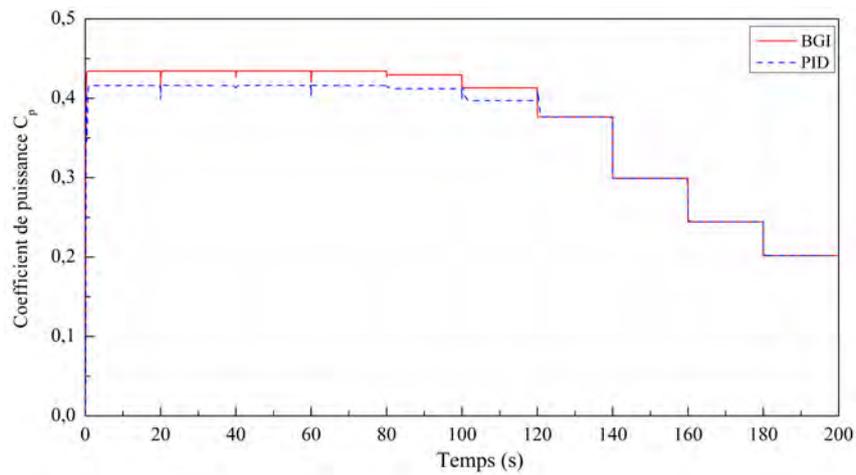


Figure 3.31: Coefficient de puissance (profil de test).

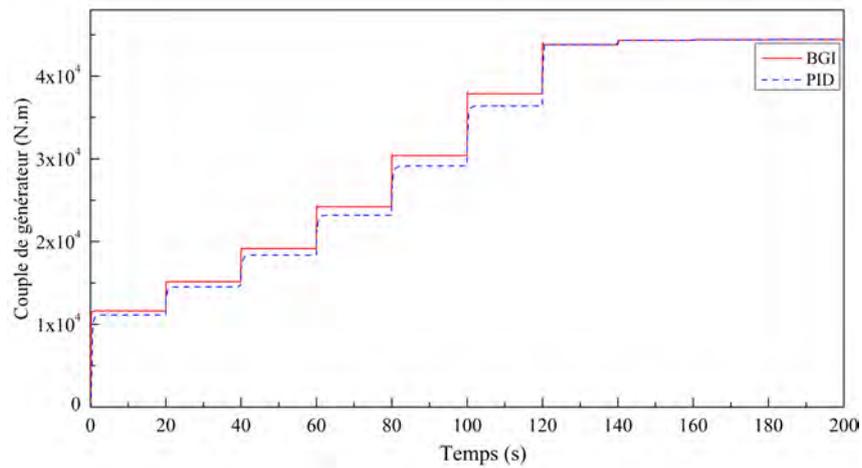


Figure 3.32: Couple du générateur (profil de test).

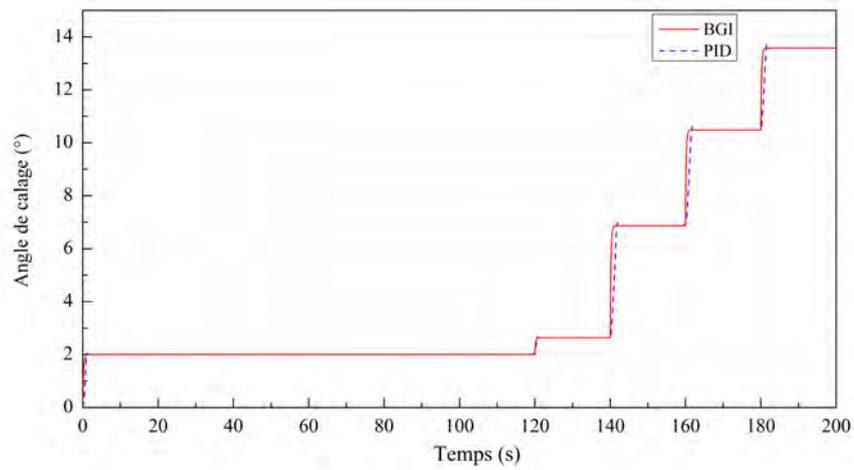


Figure 3.33: l'angle de calage (profil de test).

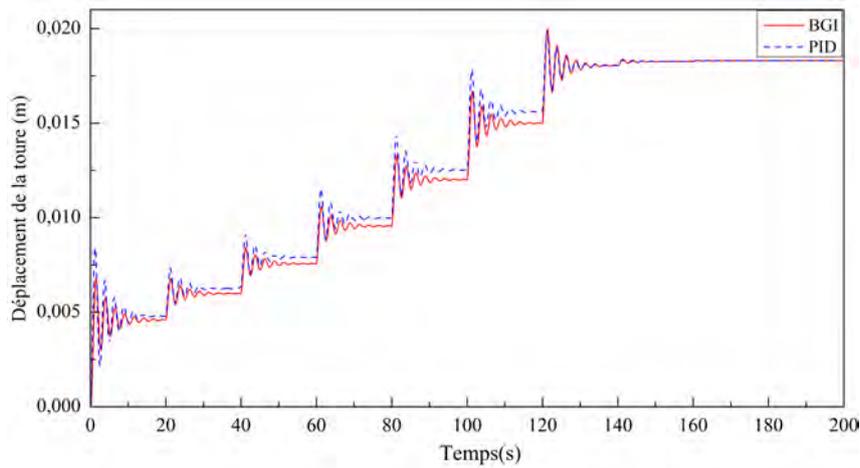


Figure 3.34: déplacement de la tour (profil de test).

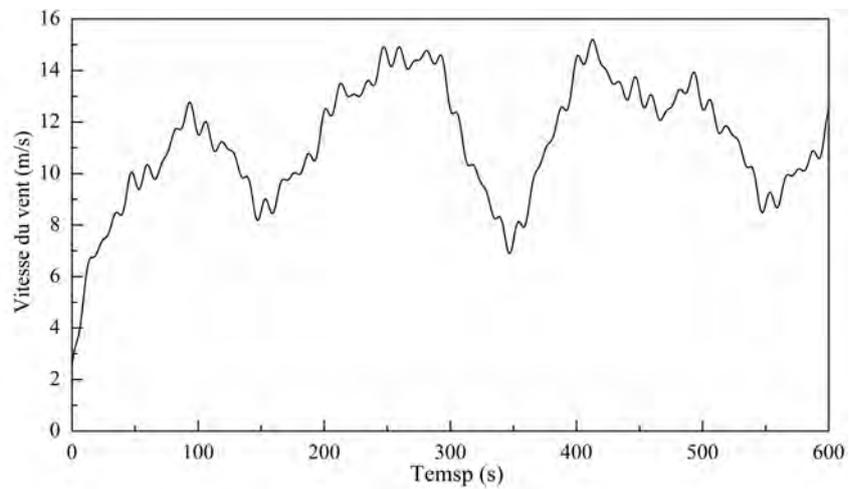


Figure 3.35: Vitesse du vent (12m/s).

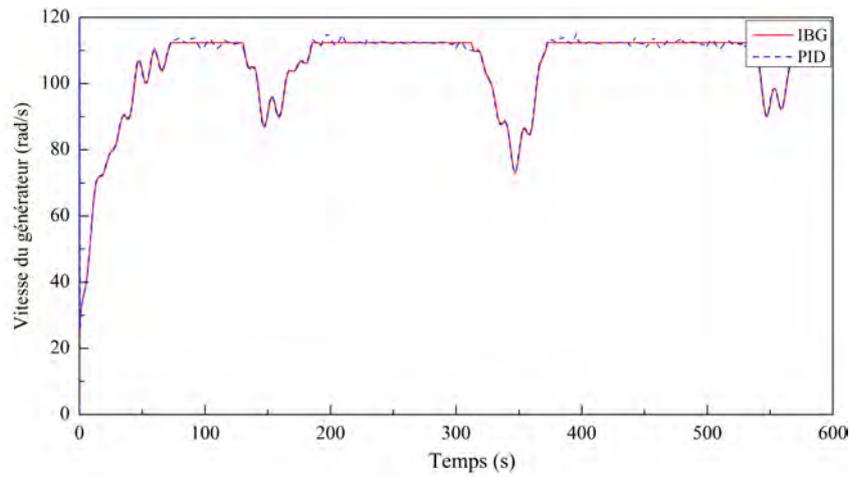


Figure 3.36: Vitesse du générateur (12m/s).

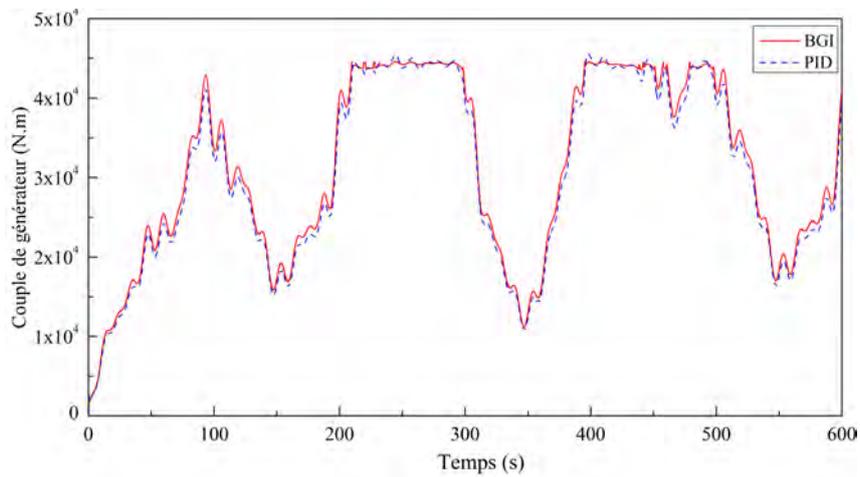


Figure 3.37: Couple du générateur (12m/s).

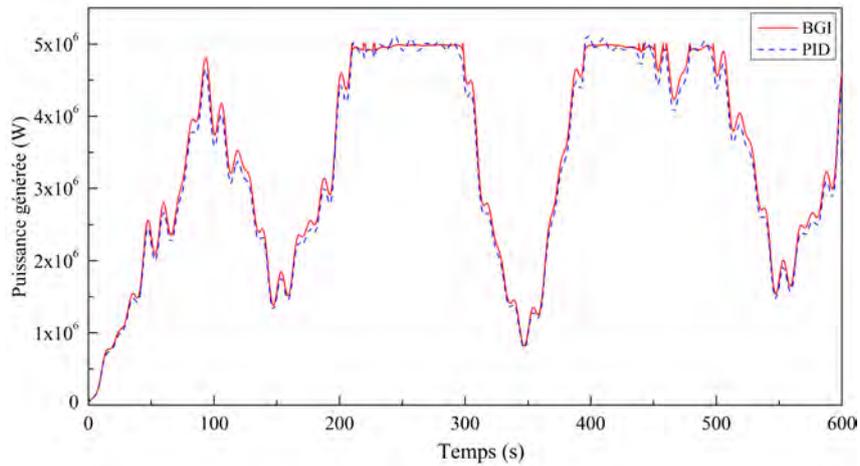


Figure 3.38: Puissance générée (12m/s).

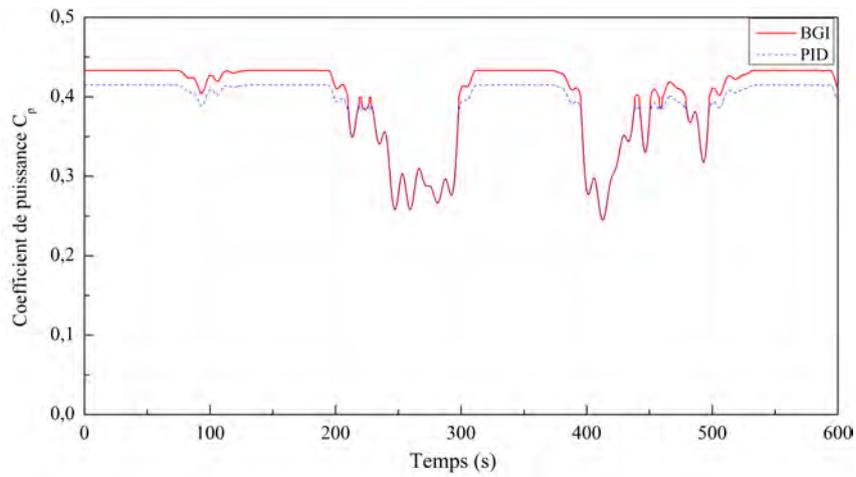


Figure 3.39: Coefficient de puissance (12m/s).

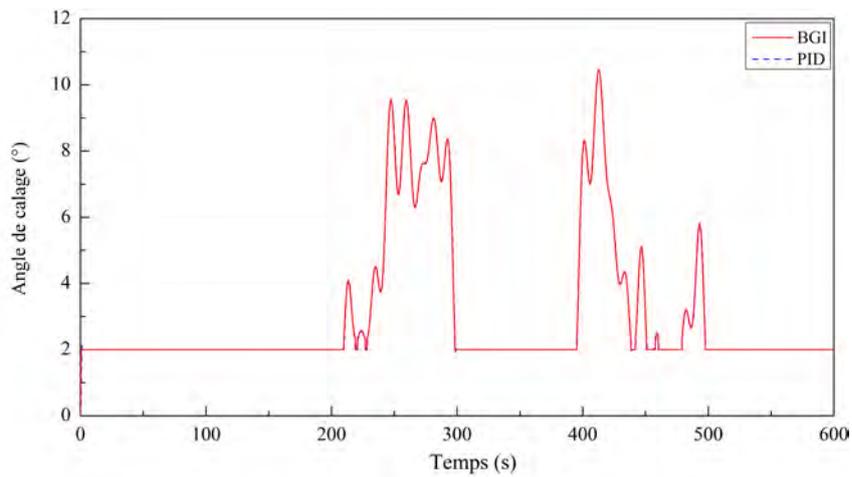


Figure 3.40: l'angle de calage (12m/s).

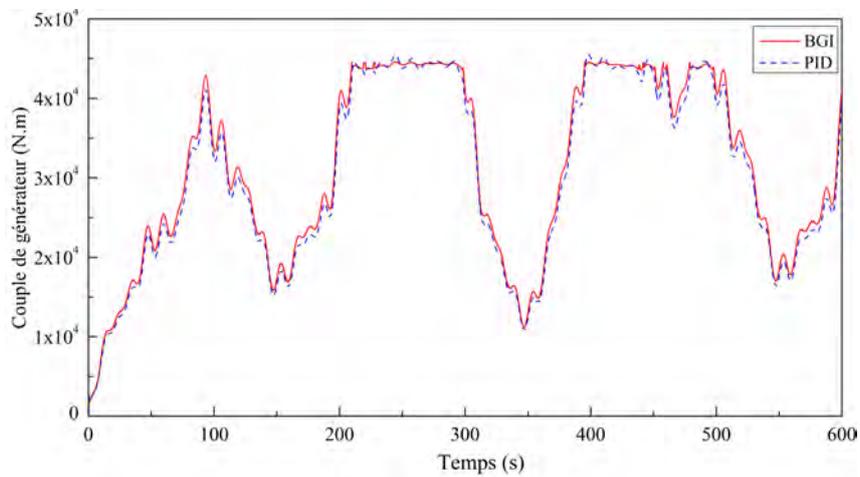


Figure 3.41: déplacement de la tour (12m/s).

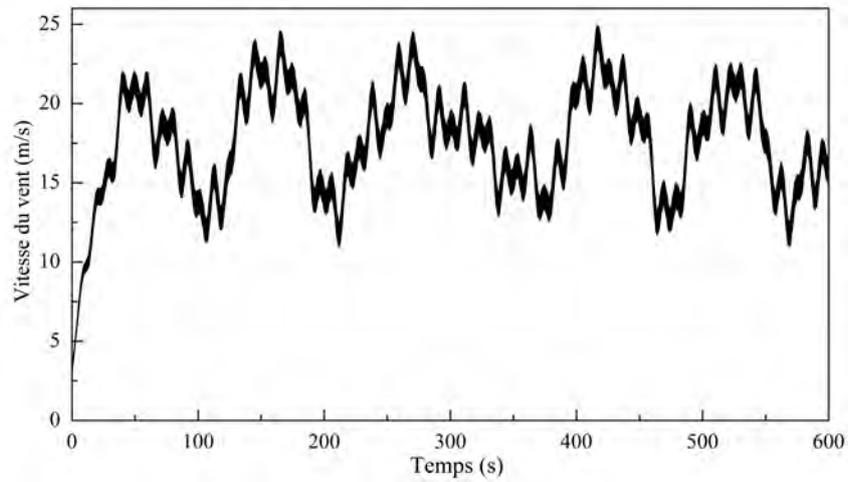


Figure 3.42: Vitesse du vent (18m/s).

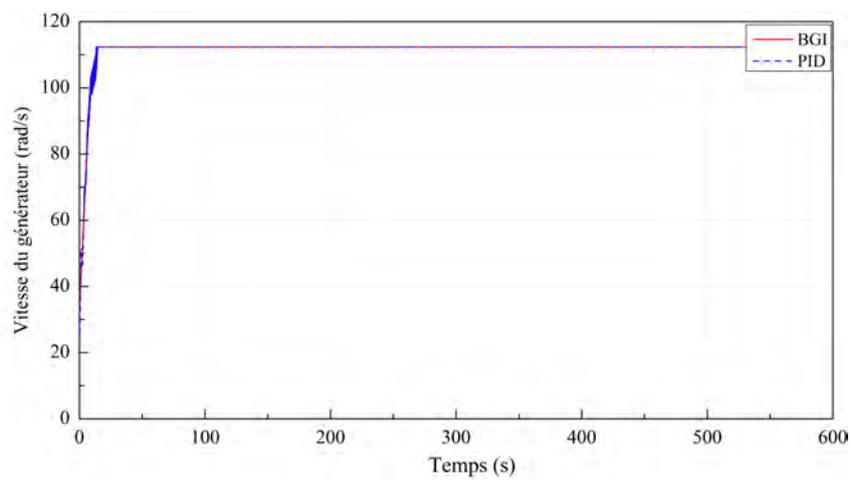


Figure 3.43: Vitesse du générateur (18m/s).

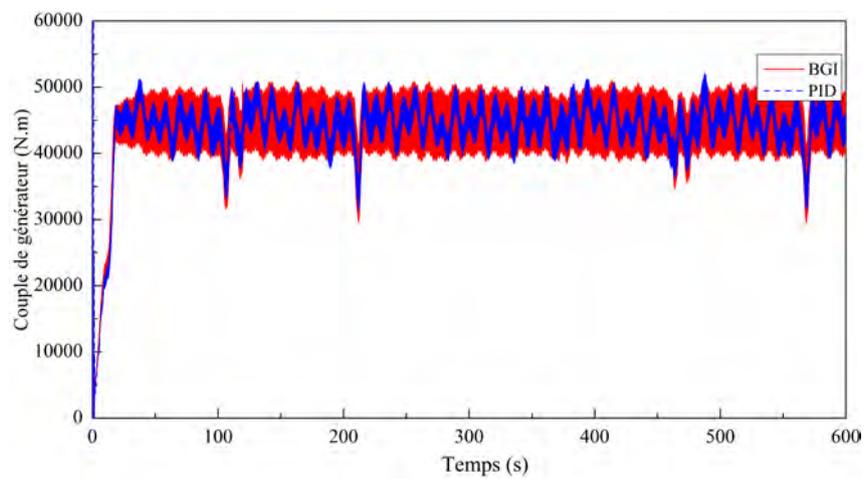


Figure 3.44: Couple du générateur (18m/s).

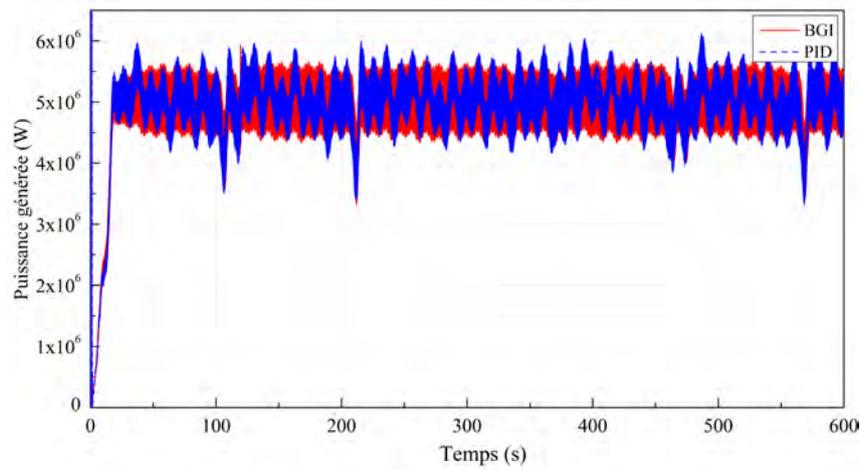


Figure 3.45: Puissance générée (18m/s).

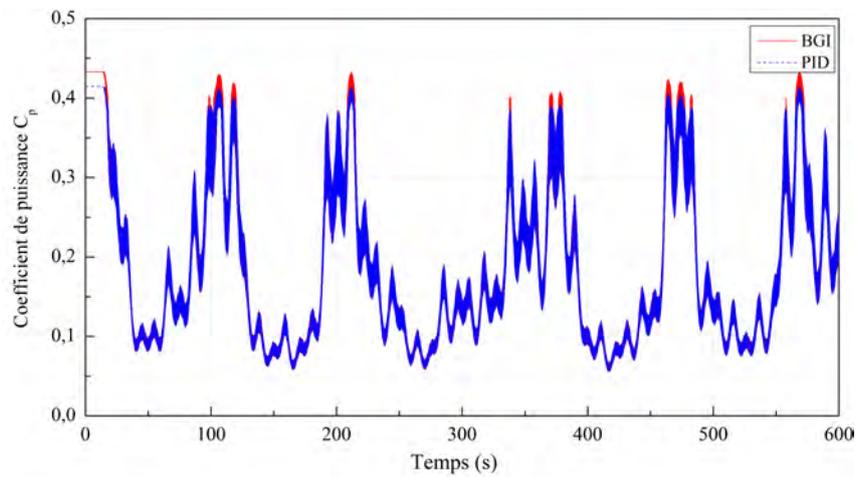


Figure 3.46: Coefficient de puissance (18m/s).

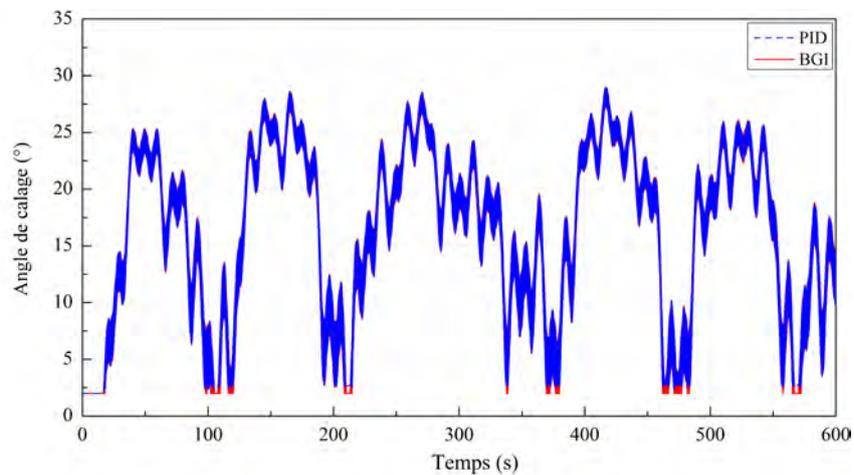


Figure 3.47: l'angle de calage (18m/s).

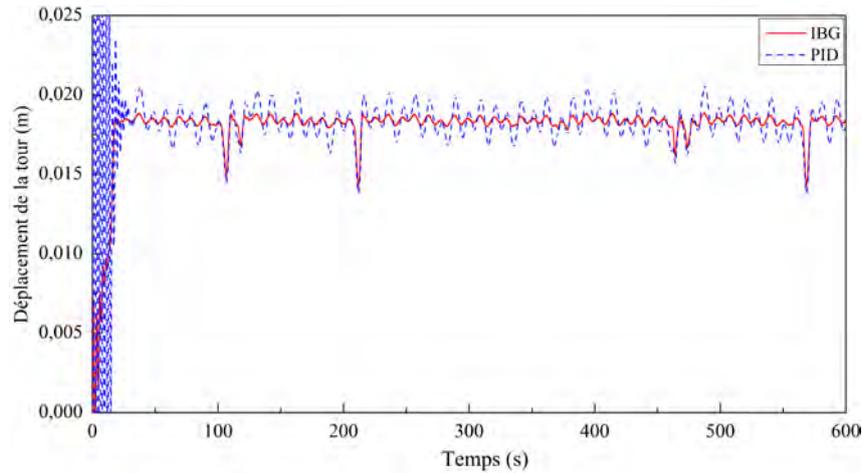


Figure 3.48: déplacement de la tour (18m/s).

3.6 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons établi une modélisation de la turbine éolienne en utilisant deux méthodes de modélisations. La première méthode a été basée sur les modèles mathématiques classiques et la deuxième est basée sur le formalisme du Bond Graph. Nous avons déduit que la modélisation par le Bond Graph est plus efficace par rapport aux méthodes classiques. La deuxième partie de ce chapitre a été consacrée à la commande de la turbine éolienne après avoir expliqué les zones de fonctionnement et les différentes stratégies de contrôle de la puissance. L'objectif principal du système de commande est de capturer le maximum de puissance dans la zone 2 et de limiter la puissance générée par la turbine sa valeur nominale dans la zone 3. Une comparaison entre le régulateur PID et le contrôleur BGI a été faite. Le comportement de la turbine a été observé à travers un modèle de simulation pour différentes conditions de fonctionnement de vent. Les résultats de simulation montrent que le contrôleur BGI a plus de performance dans toutes les zones de fonctionnement de la turbine que le régulateur PID. Toutes les variables de la turbine se comportent très bien. Dans le chapitre suivant, nous allons proposer un modèle mécatronique détaillé de la turbine éolienne incluant le modèle de la génératrice en utilisant le formalisme Bond Graph.

Modélisation mécatronique d'un système de production éolienne

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous proposons une analyse de la turbine éolienne basée sur une vision énergétique guidée par l'outil de représentation Bond Graph. Il s'agit ici d'exploiter l'aspect méthodologique et organisationnel de ce formalisme graphique afin de proposer une représentation unifiée globale de la turbine, permettant l'étude des couplages énergétiques, des transferts de puissance, entre les sous-systèmes qui le composent.

Tout d'abord, le Bond Graph à mots est utilisé pour une organisation et une description macroscopique afin d'obtenir un premier niveau de représentation. Ensuite, une modélisation détaillée des différents sous-systèmes de la turbine est présentée, dans laquelle le comportement dynamique réel du système est pris en considération. Par conséquent, la simulation finale est plus réaliste, et plus fiable pour l'analyse des performances du système.

4.2 Modélisation mécatronique de la turbine éolienne

Dans la présente étude, une modélisation mécatronique des principaux sous-systèmes d'une turbine éolienne sera présentée. Notre principal objectif est de présenter la turbine éolienne dans un cadre unifié. Dans ce but, la turbine éolienne est organisée en quatre sous-systèmes principaux, à savoir les sous-systèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques et le sous-système d'orientation des pales. Les principaux composants d'une turbine éolienne sont le rotor (les pales et le moyeu), le système de calage, le système de transmission, la tour et l'unité de générateur de la puissance électrique. La Figure 4.1 montre les différentes interactions entre ces composants. Le rotor comprend les pales où la conversion aérodynamique a lieu, le moyeu relie les pales à la transmission et au système de calage qui sont placés à l'intérieur du moyeu et qui font tourner les pales autour de leurs axes longitudinaux. Le système de transmission transmet de la puissance mécanique captée par le rotor vers la machine électrique. Il comprend l'arbre primaire, l'arbre secondaire et le multiplicateur de vitesse qui augmente la vitesse du rotor à des valeurs plus appropriées pour entraîner le générateur, typiquement de $20 - 50tr/min$ à $1000 - 1500tr/min$. Le générateur électrique est le dispositif qui convertit de l'énergie mécanique en électricité. Ses bornes sont raccordées au réseau d'électricité. Dans le cas d'une turbine à vitesse variable, un convertisseur électronique est utilisé comme une interface entre le réseau et les enroulements du stator ou du rotor.

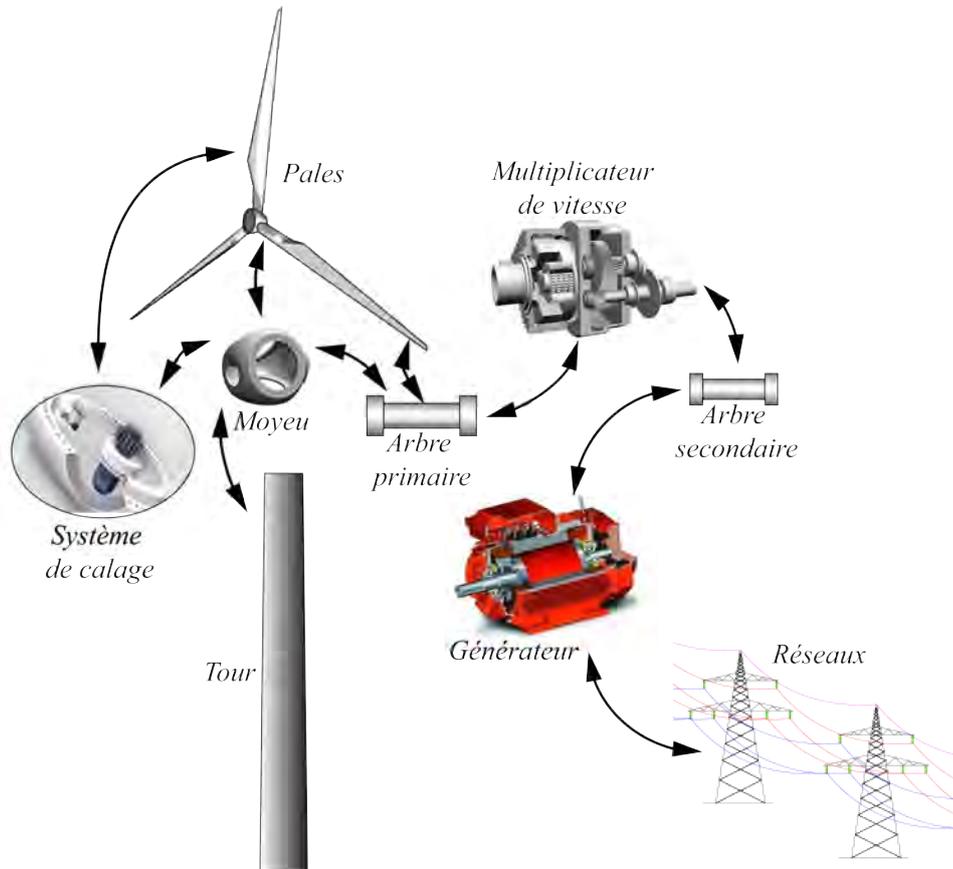


Figure 4.1: Diagramme des interactions énergétiques.

Un modèle mécatronique, qui représente le comportement dynamique de l'ensemble éolienne peut être structuré comme plusieurs modèles de sous-systèmes interconnectés (4.2). Le sous-système aérodynamique décrit la transformation du champ de vitesse tridimensionnelle du vent aux efforts appliqués sur les pales engendrant du mouvement de rotation. Le sous-système mécanique peut être divisé en deux blocs fonctionnels, à savoir : le train d'entraînement et la structure de la turbine. Le train d'entraînement transfère le couple aérodynamique sur les pales à l'arbre du générateur. Elle englobe le rotor, la transmission et la partie mécanique du générateur. La structure est constituée par la tour et les pales. Le sous-système électrique décrit la conversion de l'énergie mécanique à l'arbre du générateur en énergie électrique. Enfin, il y a le sous-système de calage.

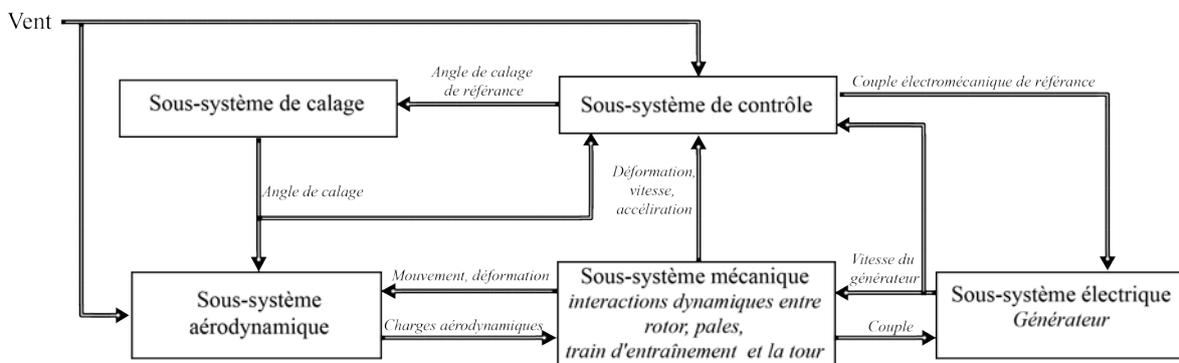


Figure 4.2: Schéma block des interactions énergétiques entre sous-systèmes.

Suite à la réflexion menée sur les outils dans le Chapitre 2, le Bond Graph à mots est utilisé en première approche. Il est choisi en tant que premier niveau de description macroscopique et énergétique de l'éolienne, pour répondre à l'objectif visé d'une représentation multiniveaux. Cette description consiste

en une décomposition de l'éolienne en sous-systèmes qui échangent de la puissance. Cette première étape est nécessaire pour un tel système complexe afin d'avoir une représentation globale de référence.

Le Bond Graph à mots offre une vision macroscopique des transferts de puissance entre les différentes parties, sans obligation d'une connaissance détaillée des sous-systèmes. Il apporte un support méthodologique pour les premières phases de modélisation. En utilisant ce principe de description et en s'appuyant sur l'étude de la chaîne de puissance présentée précédemment, nous proposons, en Figure 4.3, un bond graph à mots correspondants à l'éolienne.

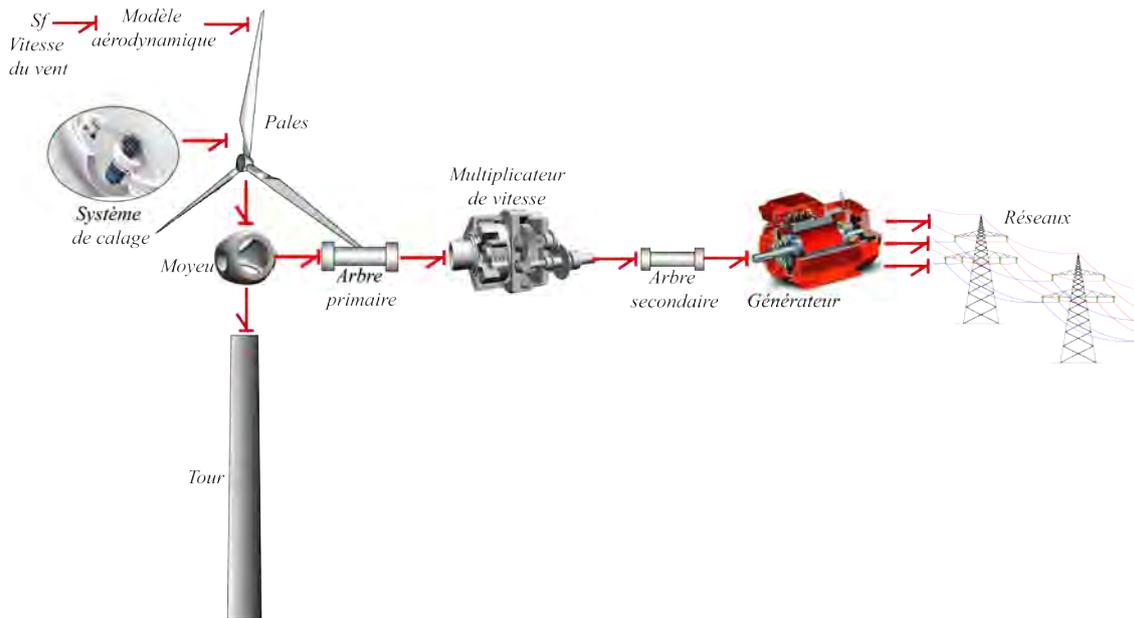


Figure 4.3: Représentation macroscopique de l'éolienne par bond graph à mots.

La causalité du premier bond a montré que le couple est fourni par les pales, puis ce couple est transféré à la boîte de vitesses, qui transforme ce couple au générateur.

4.2.1 Modélisation de sous-système mécanique.

La modélisation du sous-système mécanique est traitée dans cette section. Il est donc nécessaire de présenter, dans un premier temps, la composition de ces éléments et de comprendre leur comportement dynamique. Cette analyse est suivie d'une brève étude bibliographique sur les modélisations existantes. Finalement, la modélisation Bond Graph des sous-systèmes mécanique est proposée.

a- Description du sous-système mécanique.

Une turbine éolienne à axe horizontal est un système mécanique complexe qui se compose de plusieurs dispositifs interagissant avec un certain degré d'élasticité. Comme toute structure élastique, une éolienne présente de nombreux modes de vibration. Certains mouvements oscillatoires inhérents à ces modes sont illustrés sur la Figure 4.4 [124]. L'existence de ces modes de vibration exige une conception soignée de l'éolienne et de son contrôleur.

Pour la modélisation de la turbine éolienne, la partie la plus impliquée est probablement le sous-système mécanique. La complexité de ce sous-système provient de l'interaction de trois structures élastiques à savoir : le système de transmission, les pales et la tour et les fondations. Chacune de ces structures est liée à une référence qui tourne par rapport à l'autre. Cela conduit à des modèles non linéaires d'ordre élevé. En outre, la plupart des forces appliquées aux structures proviennent d'un champ de vent en trois dimensions.

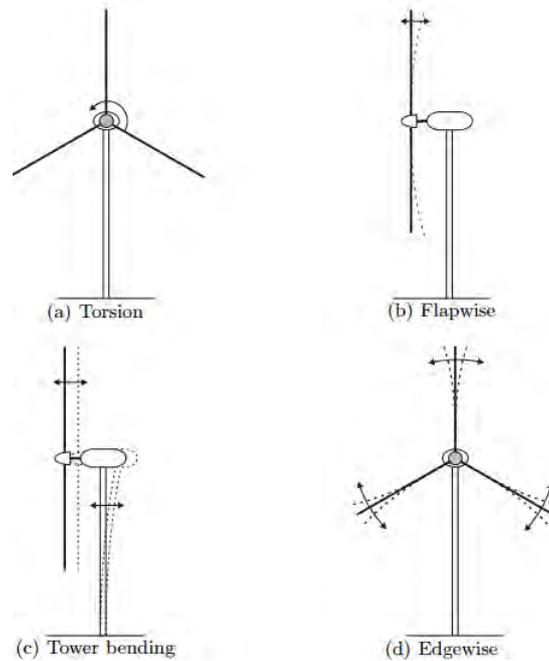


Figure 4.4: Modes de vibration pour une éolienne à axe horizontal.

Le modèle de sous-système mécanique (pales, tour, et multiplicateur de vitesses), qui prend en compte le comportement dynamique du système, peut être réalisé par diverses méthodes d'analyse [125]. Dans ce modèle, les pales et la tour sont considérées comme des poutres de Rayleigh composées d'un certain nombre de sections soumises à des forces aérodynamiques, et le multiplicateur de vitesses comme un système dynamique multi-corps. Ensuite, le modèle peut être également utilisé pour analyser le comportement dynamique de la structure du système, autrement dit de calculer le déplacement (la déformation) des pales et de la tour, de mesurer la vibration de multiplicateur et par la suite de développer des algorithmes de commande dans le but de réduire ces déformations et ces vibrations et d'augmenter la durée de vie du système en maîtrisant les effets des charges sans sacrifier la puissance aérodynamique.

b- Modélisation des pales

Les pales sont une partie très importante de l'éolienne. Elles sont fixées en haut du mât, que l'éolienne soit verticale ou horizontale. Elles sont entraînées par le vent, et leur mouvement actionne le générateur qui produit ainsi de l'électricité. Les pales sont caractérisées par :

- leurs longueurs
- leurs largeurs
- leurs profils
- leurs matériaux de construction
- leurs nombres

Dans cette section, nous étudierons le comportement dynamique des pales. Un modèle Bond Graph des pales est développé. Il consiste à considérer les pales comme une poutre en trois dimensions, comprenant un certain nombre de sections (Figure 4.5(a)). Les sections varient selon les profils aérodynamiques de NACA 4415. Dans [126, 127] seules des sections constantes ont été utilisées. De nombreuses études sur le comportement dynamique des pales ont été effectuées. Dans [128], un modèle structural des pales est proposé sur la base du modèle de la poutre de Rayleigh : la pale est considérée comme une poutre divisée en trois parties, dont chacun est soumis aux forces aérodynamiques.

Mais dans ce travail, les efforts axiaux et les moments de torsion appliqués au centre de gravité de chaque élément de la pale n'ont pas été pris en considération. Ces «lacunes» sont abordées dans le présent travail où ils sont intégrés dans notre modèle. Le modèle dynamique de la pale est représenté sur la Figure 4.5(b). La pale est modélisée par une poutre divisée en trois éléments, chaque élément étant modélisé par une masse-ressort-amortisseur, pour chaque élément les efforts aérodynamiques est appliquées. L'élément de poutre avec des forces et des moments agissant sur elle dans la convention newtonien est représenté sur la Figure 4.6.

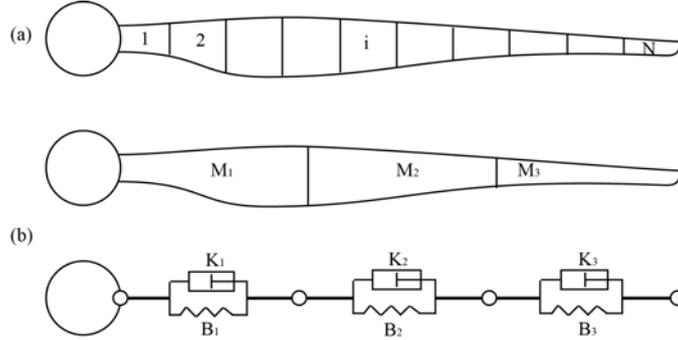


Figure 4.5: Section des pales (a), Modèle dynamique de la pale (b).

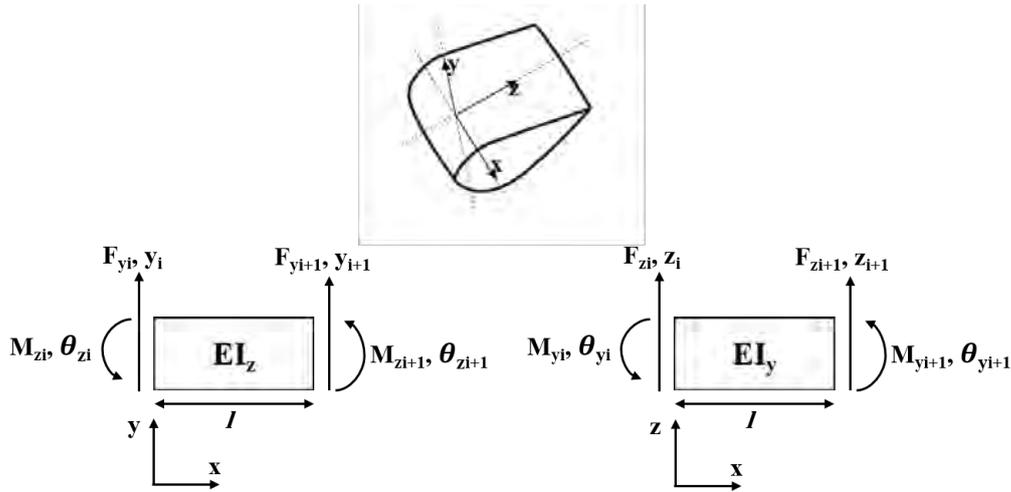


Figure 4.6: Représentation Newtonienne de l'élément de la pale.

Les rigidités de l'élément de poutre relient les efforts généralisés aux déplacements généralisés aux extrémités de l'élément sont données par les équations 4.1, 4.3 et 4.3.

$$\begin{bmatrix} F_{yi} \\ M_{zi} \\ F_{yi+1} \\ M_{zi+1} \end{bmatrix} = [K_{fzi}] \begin{bmatrix} y_i \\ \theta_{zi} \\ y_{i+1} \\ \theta_{zi+1} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\begin{bmatrix} F_{zi} \\ M_{yi} \\ F_{zi+1} \\ M_{yi+1} \end{bmatrix} = [K_{fyi}] \begin{bmatrix} z_i \\ \theta_{yi} \\ z_{i+1} \\ \theta_{yi+1} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$\begin{bmatrix} M_{xi} \\ M_{xi+1} \end{bmatrix} = [K_{ti}] \begin{bmatrix} \theta_{xi} \\ \theta_{xi+1} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Où $[K_{fzi}]$ désigne la rigidité en flexion autour de l'axe z , $[K_{fyi}]$ est la rigidité en flexion autour de

l'axe y et $[K_T]$ est la rigidité en torsion autour de x , sont expressions est données par 4.4, 4.5 et 4.6 :

$$[K_{fzi}] = \frac{E(I_{zi-1} + I_{zi})}{L_i^3} \begin{bmatrix} 12 & 6(l_{i-1} + l_i/2) & -12 & 6(l_{i-1} + l_i/2) \\ 6(l_{i-1} + l_i/2) & 4(l_{i-1} + l_i/2)^2 & -6(l_{i-1} + l_i/2) & -2(l_{i-1} + l_i/2)^2 \\ -12 & -6(l_{i-1} + l_i/2) & 12 & -6(l_{i-1} + l_i/2) \\ 6(l_{i-1} + l_i/2) & 2(l_{i-1} + l_i/2)^2 & -6(l_{i-1} + l_i/2) & 4(l_{i-1} + l_i/2)^2 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$[K_{fyi}] = \frac{E(I_{yi-1} + I_{yi})}{L_i^3} \begin{bmatrix} 12 & -6(l_{i-1} + l_i/2) & -12 & -6(l_{i-1} + l_i/2) \\ -6(l_{i-1} + l_i/2) & 4(l_{i-1} + l_i/2)^2 & 6(l_{i-1} + l_i/2) & 2(l_{i-1} + l_i/2)^2 \\ -12 & 6(l_{i-1} + l_i/2) & 12 & 6(l_{i-1} + l_i/2) \\ -6(l_{i-1} + l_i/2) & 2(l_{i-1} + l_i/2)^2 & 6(l_{i-1} + l_i/2) & 4(l_{i-1} + l_i/2)^2 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$[K_{ti}] = \frac{GJ_i}{L_i} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Où E est le module d'Young du matériau, G est le module de Coulomb, I_{yi} , I_{zi} les seconds moments autour des axes y et z , J_i les moments d'inertie polaire et L_i les longueurs de chaque élément, la matrice d'amortissement structural est donnée par $[R_i] = \mu[K_i]$, où le facteur μ représente le coefficient d'amortissement structural.

Le modèle Bond Graph de la pale est représenté sur la Figure 4.7. La Figure 4.7(a) représente la déformation axiale de la pale, la Figure 4.7(b) représente la déformation tangentielle et à la Figure 4.7(c) représente la déformation par torsion de la pale. Pour les modèles des Figure 4.7(a) 4.7(b) deux mouvements sont présentés : mouvements de rotation et translation. Le modèle de la Figure 4.7(c) est représenté par un seul mouvement de rotation. Pour chaque modèle, les translations et les rotations du centre de gravité de chaque élément sont représentées par la jonction 1. Pour chaque élément, les forces aérodynamiques sont appliquées, ce qui signifie que l'effort est imposé. La rigidité et l'amortissement structural entre deux éléments adjacents sont représentés en utilisant respectivement des éléments C-field et R-field. La masse M_i et l'inertie J_i de chaque élément sont représentées par l'élément I .

Les conditions aux limites du modèle pour la déformation tangentielle sont représentées par les sources Sf et Se . Le raccordement entre le bas de la pale et le moyeu doit être rigide [129], donc pas de déplacement de cette extrémité de la pale, ce qui est traduit par $Sf = 0$, et la pale est libre dans l'autre extrémité par conséquent $Se = 0$. Les conditions aux limites pour la déformation axiale est représenté par la source Se et deux jonctions 1, l'extrémité haute de la pale est libre donc $Se = 0$. Le raccordement entre la pale et le moyeu, ainsi que la liaison entre le moyeu et la tour sont supposés rigides. Par conséquent, le mouvement dans la partie supérieure de la tour est le même que le mouvement en bas des pales. Cette relation entre la pale et la tour peut être effectuée par la jonction 1. Les conditions limites pour la déformation par torsion sont représentées par la source Sf qui représente la vitesse du système de calage. Les équations dynamiques et les fréquences naturelles de la pale peuvent être obtenues directement à partir du modèle Bond Graph.

Les trois sources d'effort qui représentent les forces aérodynamiques doivent être calculées. Ce processus sera traité dans la section suivante. Pour simplifier la représentation du modèle Bond Graph, les trois modèles de la pale sont rassemblés dans un seul modèle (Figure 4.8).

Pour vérifier la validité du modèle, une simulation du couple au niveau de rotor de la pale est représentée sur la Figure 4.9. Les paramètres du système sont donnés à l'annexe A. Des forces aérodynamiques tangentielles constantes sont appliquées au centre de gravité de chaque élément ($Se = 100N$). Ces forces sont transformées en un couple de rotation au niveau du rotor de la pale par la relation $T = \sum_{i=1}^3 r_i F_i$. Cette simulation montre que le couple dans l'état d'équilibre est égal à $3510, 25N.m$. Sur la base des paramètres en annexe A, nous avons $T = 100 * 3, 9 + 100 * 11, 7 + 100 * 19, 5 = 3510N.m$. Nous trouvons la même valeur du couple. Par conséquent, le modèle fonctionne très bien. Les vibrations présentées au début de simulation sont dues au comportement dynamique entre la rigidité et l'inertie de la structure.

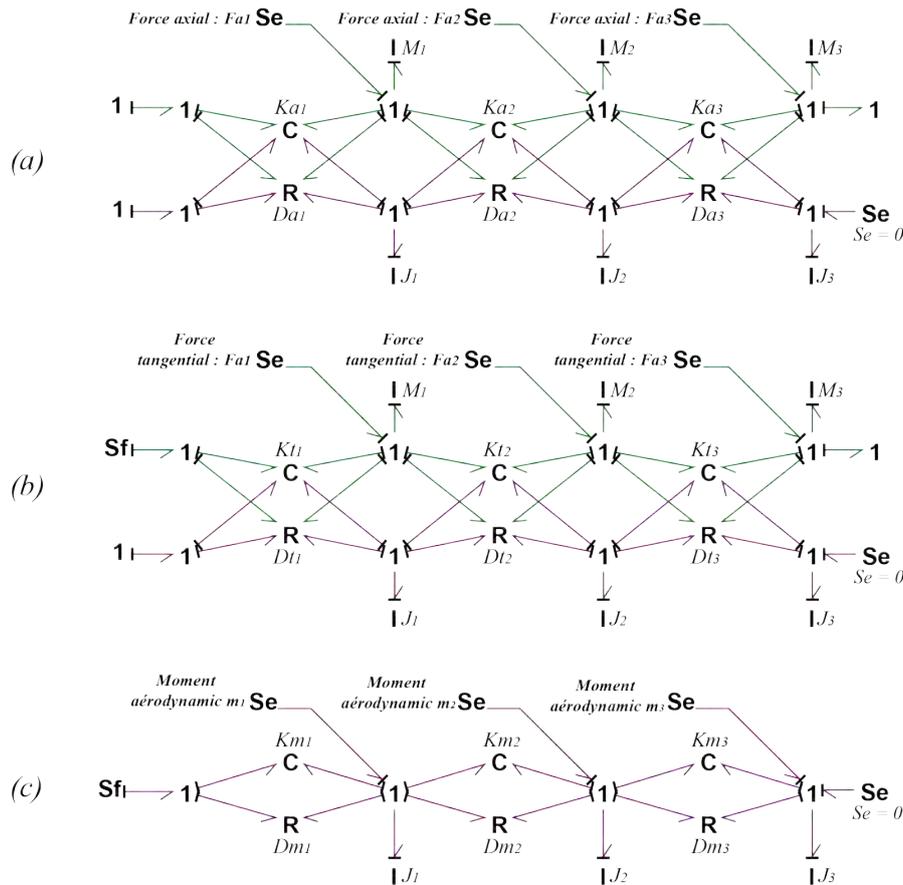


Figure 4.7: Représentation Bond Graphe de la pale.

c- Modélisation du moyeu

Le moyeu relie : les pales par le système de transmission dans la direction tangentielle, les pales par la tour dans la direction axiale et les pales par le système de calage dans la direction de torsion de la pale. Ce dernier est situé à l'intérieur du moyeu et fait tourner les pales autour de leurs axes longitudinaux. Le modèle Bond Graph du moyeu est représenté sur la Figure 4.10.

La Figure 4.10(a) esquisse la liaison entre le modèle tangential de la pale et la transmission. I_{hub} (l'élément I) et D_{hub} (l'élément R) représentent respectivement l'inertie et le frottement au niveau du palier du moyeu. La Figure 4.10(b) montre la relation entre le modèle axial de la pale et la tour. La Figure 4.10(c) traite la connexion entre le modèle de moment de torsion et le système calage. Le modèle de la Figure 4.11 peut représenter le modèle du moyeu.

d- Modélisation de la tour

La tour d'une turbine éolienne est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Elle supporte toutes les composantes du système éolienne. Sa hauteur est importante, plus elle augmente plus la vitesse du vent augmente. En général, le mat (la tour) a une hauteur légèrement supérieure au diamètre des pales. La tour d'une éolienne est soumise à des charges de vent aléatoires, ces charges produisent de grandes vibrations qui pourraient, sur le long terme, conduire à la fatigue [130]. Par conséquent, le système de contrôle doit être conçu de manière à réduire les effets des charges externes et à minimiser les vibrations de la tour. Ceci nécessite un modèle détaillé de la tour.

Dans notre système, la tour est modélisée sous la forme d'un faisceau tubulaire de Rayleigh avec trois sections différentes Figure 4.12. Cependant, il peut être divisé en plusieurs segments. Les charges du vent sur le rotor de la turbine sont transférées à la tour comme des moments de flexion au sommet

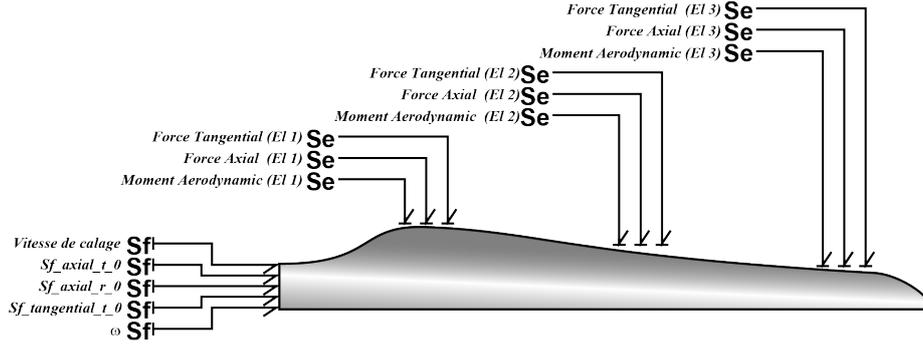


Figure 4.8: Modèle Bond Graphe de la pale.

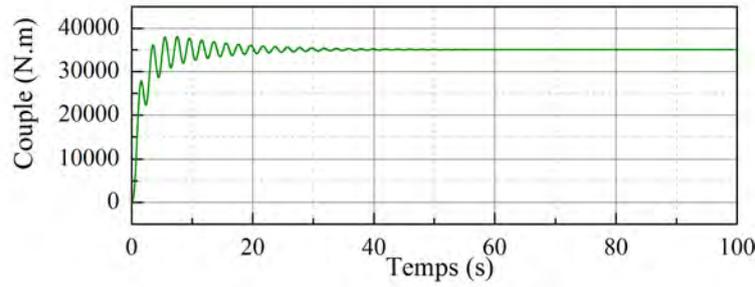


Figure 4.9: Simulation de couple d'une pale.

de la tour. Dans la représentation cartésienne de la Figure 4.12(a), l'axe z est supposé coïncider avec l'axe élastique de la tour, l'axe y est dans la direction du vent. Le modèle est construit sur l'hypothèse que chaque segment possède des propriétés transversales uniformes (Figure 4.12(b)). Afin de trouver les propriétés de vibration de la structure, la tour de l'éolienne est modélisée comme une poutre tubulaire élastique avec un rotor rigide sur le dessus et une base fixe sur le terrain. Le modèle dynamique de la tour est représenté sur la Figure 4.12(c).

La rigidité de l'élément de poutre relie les efforts généralisés aux déplacements généralisés aux extrémités de l'élément, cette relation est décrite par l'équation 4.7.

$$\begin{bmatrix} F_{yi} \\ M_{xi} \\ F_{yi+1} \\ M_{xi+1} \end{bmatrix} = [K_{fyi}] \begin{bmatrix} y_i \\ \theta_{xi} \\ y_{i+1} \\ \theta_{xi+1} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Avec:

$$[K_{fyi}] = \frac{E(I_{xi-1} + I_{xi})}{L_i} \begin{bmatrix} 12 & 6(l_{i-1} + l_i/2) & -12 & 6(l_{i-1} + l_i/2) \\ 6(l_{i-1} + l_i/2) & 4(l_{i-1} + l_i/2)^2 & -6(l_{i-1} + l_i/2) & -2(l_{i-1} + l_i/2)^2 \\ -12 & -6(l_{i-1} + l_i/2) & 12 & -6(l_{i-1} + l_i/2) \\ 6(l_{i-1} + l_i/2) & 2(l_{i-1} + l_i/2)^2 & -6(l_{i-1} + l_i/2) & 4(l_{i-1} + l_i/2)^2 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Où E est le module d'Young du matériau, I_{xi} le second moment autour de l'axe x et L_i est la longueur de l'élément, la matrice d'amortissement structural est donnée par $[R_i] = \mu[K_i]$, où le facteur μ représente le coefficient d'amortissement structural. Le modèle Bond Graph de la tour est représenté sur la Figure 4.13(a).

Les conditions aux limites de la base de la tour sont représentées par des sources de flux nulles ($Sf = 0$) parce que la base de la tour est fixée sur le sol. La connexion entre le sommet de la tour et les pales dans la déformation axiale est assurée par la jonction 1. La Figure 4.13(b) représente le modèle Bond Graph de la tour. On suppose que le mouvement de la tour va influencer la vitesse du vent de l'entrée du sous-système aérodynamique.

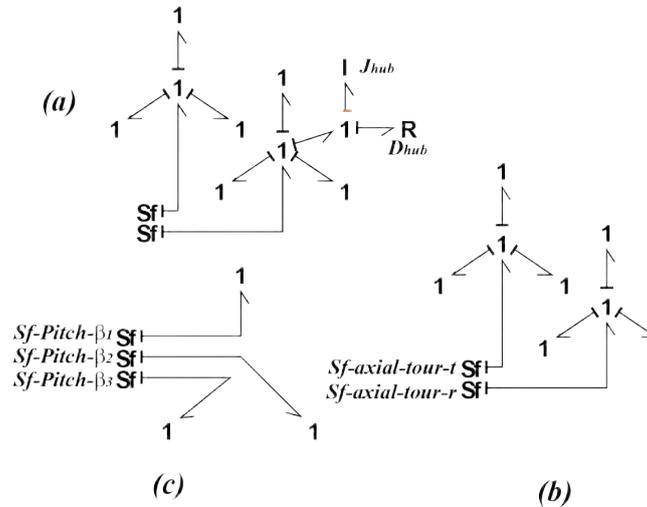


Figure 4.10: Représentation Bond Graph du moyen.

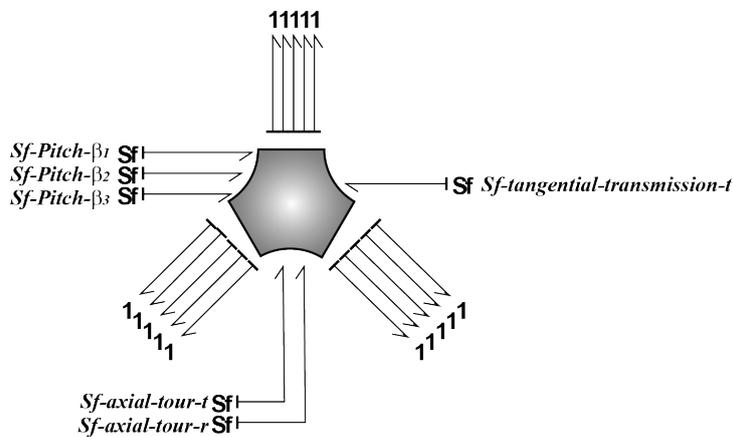


Figure 4.11: Modèle Bond Graph du moyen.

e- Modélisation du multiplicateur de vitesses

Le multiplicateur de vitesses est utilisé dans les turbines éoliennes pour augmenter la vitesse angulaire. Il est la partie la plus importante d'une éolienne, car, à ce stade, la plupart des défauts se produisent, [131] estime que la durée de vie d'une éolienne est environ 20 ans, mais normalement le multiplicateur de vitesses doit être remplacé tous les 5 ans. Pour cette raison, les grandes entreprises de fabrication d'éoliennes ont l'intention d'utiliser une turbine à entraînement direct sans multiplicateur de vitesses.

De nos jours, la plupart des éoliennes installées utilisent un multiplicateur de vitesses. Sur la base de ce cadre, un modèle de multiplicateur de vitesses est présenté en termes de l'approche Bond Graph. Le modèle Bond Graph d'un multiplicateur (ou réducteur) de vitesses a été abordé dans plusieurs ouvrages [132, 133]. Le multiplicateur de vitesses peut être modélisé par un simple élément transformateur (élément TF du Bond Graph) dans lequel le rapport de multiplication est : $r_m = \omega_g / \omega_r$, où ω_r la vitesse de rotation du rotor de la turbine et ω_g la vitesse de rotation du générateur. Mais ce modèle ne décrit pas le comportement dynamique de multiplicateur de vitesses. Par conséquent, un modèle plus précis doit être développé. Ce modèle sera utilisé dans un travail futur étudier les défauts présentés par un multiplicateur (ou réducteur) de vitesse.

Le multiplicateur de vitesses de la turbine éolienne étudié est composé de trois étages. Le premier étage est un engrenage planétaire et les deux autres étages sont des engrenages parallèles. Le schéma

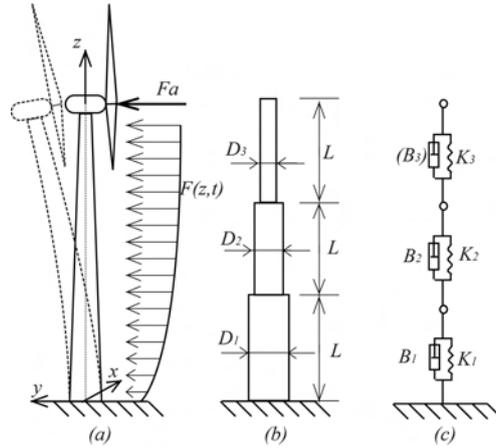


Figure 4.12: Représentation de la tour.

du multiplicateur de vitesses est représenté sur la Figure 4.14.

Dans [134] un modèle Bond Graph détaillé de multiplicateur de vitesse est proposé. Le modèle d'engrenage planétaire est présenté en détail, mais l'engrenage parallèle est modélisé par un simple élément TF. Cette publication est considérée comme une référence pour développer notre modèle, à laquelle on ajoute un modèle détaillé de l'étape d'engrenage parallèle. En outre, l'amortissement de tous les composants du système est également pris en compte.

Pour un engrenage planétaire, plusieurs satellites identiques (p) engrenages avec la couronne (r) et le planétaire centrale (s), le bras porte satellites (c) supporte tous les satellites. Les satellites tournent dans deux modes cinématiques : la première est la révolution autour de la roue solaire (planétaire centrale (s)) et la deuxième est l'autorotation autour de son propre axe. Un modèle cinématique du train épicycloïdal est représenté sur la Figure 4.15.

Selon la relation cinématique présentée sur la Figure 4.15, les vitesses de translation aux points de contact A et B peuvent être décrites comme suit :

$$V_{pA} = -\omega_p r_p + \omega_c r_r \quad (4.9)$$

$$V_{rA} = \omega_r r_r \quad (4.10)$$

$$V_{pB} = \omega_p r_p + \omega_c r_s \quad (4.11)$$

$$V_{sB} = \omega_s r_s \quad (4.12)$$

Où, ω_j et r_j ($j = r, s, p$) représentent respectivement la vitesse de rotation et le rayon du cercle primitif des éléments : r , s et p . A est le point de contact entre la couronne (r) et le satellite (p), et B est le point de contact entre le satellite (p) et la roue solaire (s). V_{pA} et V_{pB} sont les vitesses linéaires des satellites aux points A et B le long de la direction tangentielle. De même, V_{rA} est la vitesse linéaire de la couronne en A et V_{sB} est la vitesse linéaire de la planétaire centrale en B .

Dans la modélisation dynamique d'un système d'engrenages, les interconnexions entre deux roues sont généralement modélisées comme un système ressort-amortisseur [135, 136]. La raideur du ressort est l'une des principales sources de vibrations des engrenages. Le modèle dynamique de l'étage planétaire est représenté sur la Figure 4.16(a). En se basant sur cette figure et les équations cinématiques 4.9-4.12 on peut construire le modèle Bond Graph de cet étage (Figure 4.16(b)).

Les satellites sont représentés par le moment d'inertie J_{pi} ($i = 1, 2, 3$). Ils sont reliés entre eux par le bras porte satellite, par conséquent, ils ont la même vitesse de rotation imposée par le bras porte

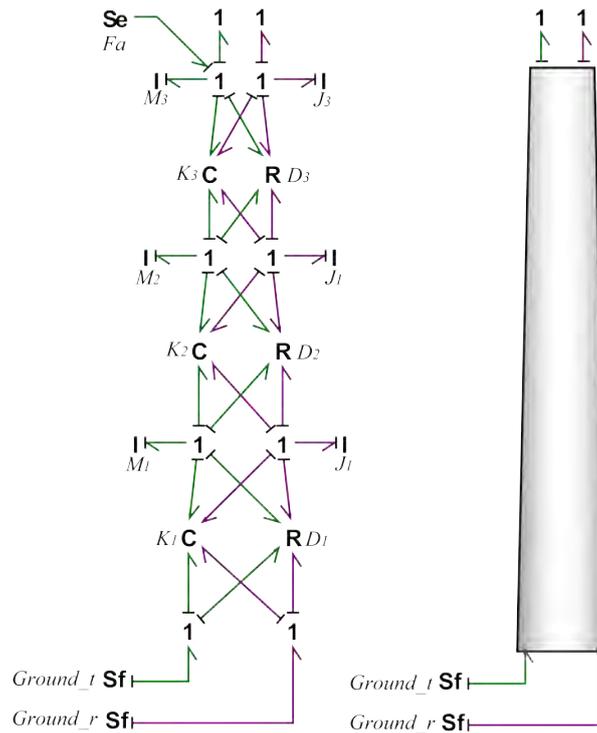


Figure 4.13: Représentation Bond Graph de la tour.

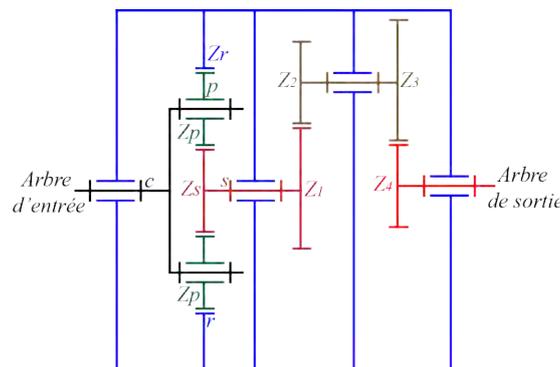


Figure 4.14: Schéma du multiplicateur de vitesses.

satellite (c) qui est la vitesse d'entrée du multiplicateur et qui est représenté par la jonction 1 au milieu du modèle (Figure 4.16(b)). J_c désigne l'inertie du bras porte satellite. Ces satellites sont bornés au planétaire central et/ou couronne respectivement par la rigidité (élément C) et l'amortissement (élément R) K_{sp} , B_{sp} et K_{rp} , B_{rp} .

L'inertie de la couronne est représentée par l'élément I (J_r). La connexion entre la couronne et le carter du multiplicateur est supposée rigide (couronne fixe) et la liaison entre le carter et la nacelle (on suppose que la nacelle est fixe $Sf = 0$) est réalisé par une liaison élastique modélisée par un ressort-amortisseur des paramètres K_{rg} et B_{rg} (partie haut-gauche de la Figure 4.16(b)). Dans cette articulation, le signal vibratoire du multiplicateur peut être obtenu. Dans le modèle, Z_i ($i = p, s, r$) représente le nombre de dents de chaque engrenage.

La jonction 1 (partie haut-droite de la Figure 4.16(b)) représente la vitesse angulaire de planétaire centrale (vitesse de sortie du premier étage) et J_s son inertie. Le bras porte satellite, la couronne et la planétaire centrale sont reliés entre eux par des éléments TF. Les jonctions zéro entre les transformateurs représentent la variable d'effort entre les éléments dans la direction tangentielle.

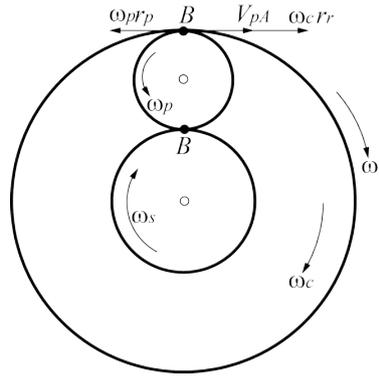


Figure 4.15: Modèle cinématique du train épicycloïdal.

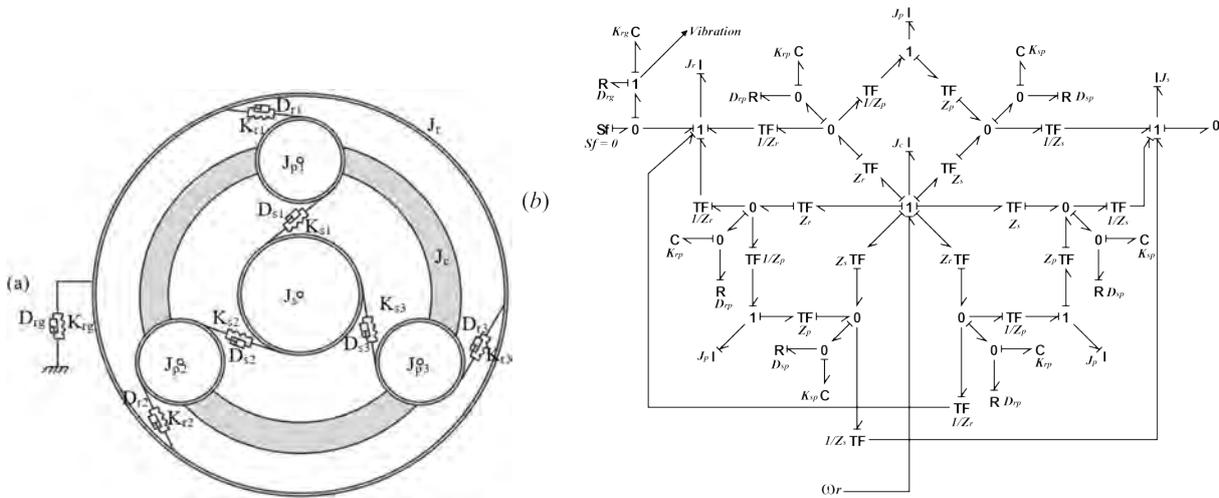


Figure 4.16: Modèle dynamique du train épicycloïdal (a), modèle Bond Graph du train épicycloïdal (b).

L'étage parallèle d'engrenage du multiplicateur de vitesses de la turbine éolienne est composé de deux étages (Figure 4.16(a)). Son modèle dynamique ainsi que le modèle Bond Graph sont présentés sur la Figure 4.17.

Le modèle Bond Graph complet du multiplicateur de vitesses de la turbine éolienne est représenté sur la Figure 4.18

La Figure 4.19 représente une simulation des comportements du multiplicateur de vitesses. Un couple constant est appliqué à l'entrée de multiplicateur ($Se = 60N.m$). Ce couple est diminué avec un rapport de 60 à la sortie du multiplicateur. Le même résultat est observé dans les courbes de vitesse angulaire quand une vitesse angulaire constante ($Sf = 60rad/s$) est appliquée à la sortie du multiplicateur (il est réduit à l'entrée avec un rapport de 60). À partir du nombre de dents de chaque engrenage présenté à l'Annexe C, nous pouvons calculer le rapport du multiplicateur de vitesse, qui est égale à 60. Cela vient en harmonie avec les prédictions du modèle Bond graph, ce qui confirme la validité du modèle. Le système présente des vibrations dans le régime transitoire dues à la dynamique du système.

Le modèle du sous-système mécanique de la turbine éolienne est représenté sur la Figure 4.20, où toutes les parties du sous-système mécanique sont liées entre elles par l'intermédiaire du moyeu.

4.2.2 Modélisation de sous-système aérodynamique

La modélisation aérodynamique de la turbine éolienne est une étape essentielle dans la conception de cette machine. Son objectif est de calculer les efforts aérodynamiques qui s'exercent sur les pales, de

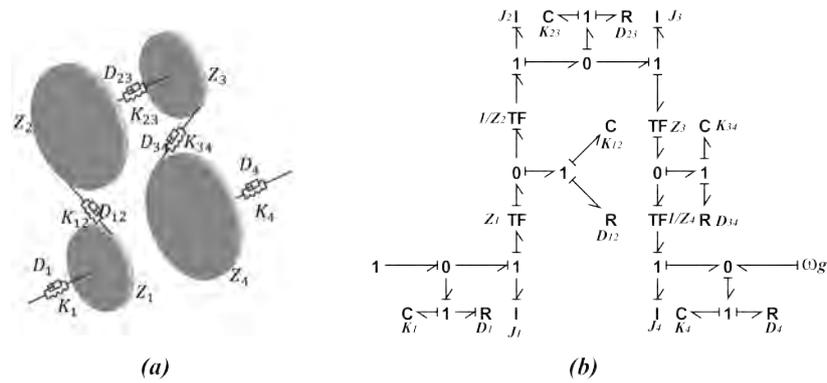


Figure 4.17: Modèle dynamique du train parallèle (a), modèle Bond Graph du train parallèle (b).

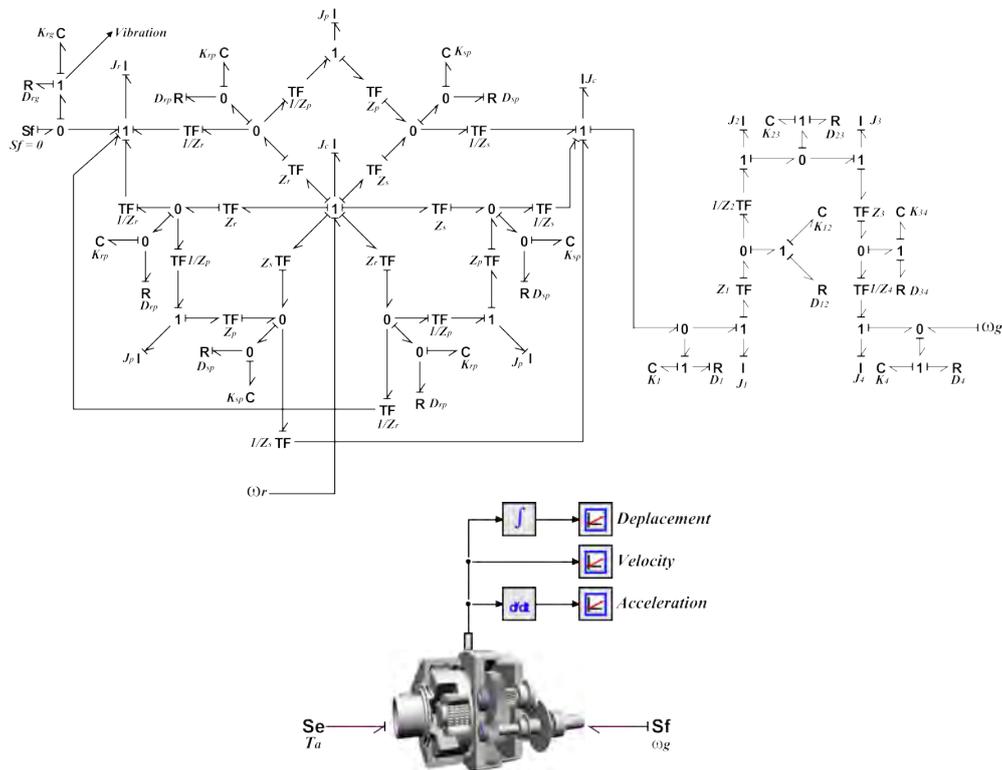


Figure 4.18: Modèle Bond Graph complet du multiplicateur.

déterminer les paramètres optimaux de ces pales et d'estimer la puissance maximale extraite par cette machine. Cette modélisation est une tâche complexe à cause de la rotation de l'hélice de la turbine qui crée un écoulement tridimensionnel de l'air autour des pales. La modélisation du sous-système aérodynamique est basée sur la combinaison de deux théories, la première est celle de l'écoulement axial (the axial momentum theory), la deuxième est celle de l'élément de la pale (blade element theory) [137, 138].

Dans la première théorie, un modèle unidimensionnel est utilisé pour exprimer l'énergie extraite du vent, en supposant que l'air est incompressible. Dans cette théorie les hypothèses suivantes sont faites [139] :

- L'écoulement est totalement axial (l'air ne subit aucun mouvement de rotation).
- L'écoulement est incompressible.
- La vitesse du vent est constante loin du plan du rotor.
- L'écoulement est rotationnellement symétrique.

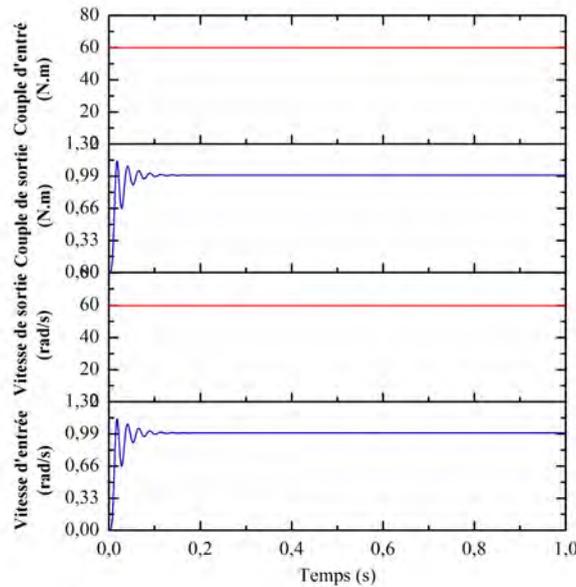


Figure 4.19: Simulation de multiplicateur de vitesses.

- L'air passe à travers le rotor sans frottement.

En appliquant le principe de la conservation de masse, l'équation de Bernoulli en amont du rotor, en introduisant les facteurs d'interférence axiale¹ a et tangentielle² a' et avec quelques substitutions on peut déterminer l'expression de la force élémentaire axiale dF_T et tangentielle dF_r appliquée sur les pales comme :

$$dF_T = 4a(1-a)\rho V^2 \pi r dr \quad (4.13)$$

$$dF_r = 4a'(1-a)\rho V \omega_r \pi r^2 dr \quad (4.14)$$

Où V représente la vitesse du vent, ρ la masse volumique de l'air, a le facteur d'interférence axiale, a' le facteur d'interférence tangentielle, ω_r la vitesse angulaire des pales, et r est le rayon d'un élément annulaire, ayant une épaisseur de dr .

Dans ce modèle, on a supposé que l'écoulement ne subit aucun mouvement de rotation, mais, en réalité, la loi de conservation du moment cinétique impose que l'air doive avoir un mouvement rotatif afin que le rotor puisse extraire un couple utile. L'introduction du mouvement de rotation de l'air permet à ce modèle de mieux approcher la réalité et d'obtenir des résultats plus fiables (la théorie de l'élément de la pale (blade element theory)).

Dans l'élaboration de la théorie de l'élément de la pale, les suppositions suivantes sont envisagées [140] :

- L'écoulement en amont loin du plan du rotor, est complètement axial.
- Au niveau du plan du rotor, la vitesse angulaire de rotation de l'air est Ω_r . Cette vitesse diminue considérablement loin du rotor, en aval, de telle manière que la pression statique à cet endroit peut être considérée égale à la pression atmosphérique.

¹Le facteur d'interférence axial a est défini comme la fraction de diminution de la vitesse du vent, entre celle de l'écoulement libre en amont du rotor et celle traversant le plan du rotor

²Le facteur d'interférence tangentielle a' est défini comme la fraction de la vitesse de rotation du vent par celle du rotor dans le plan du rotor

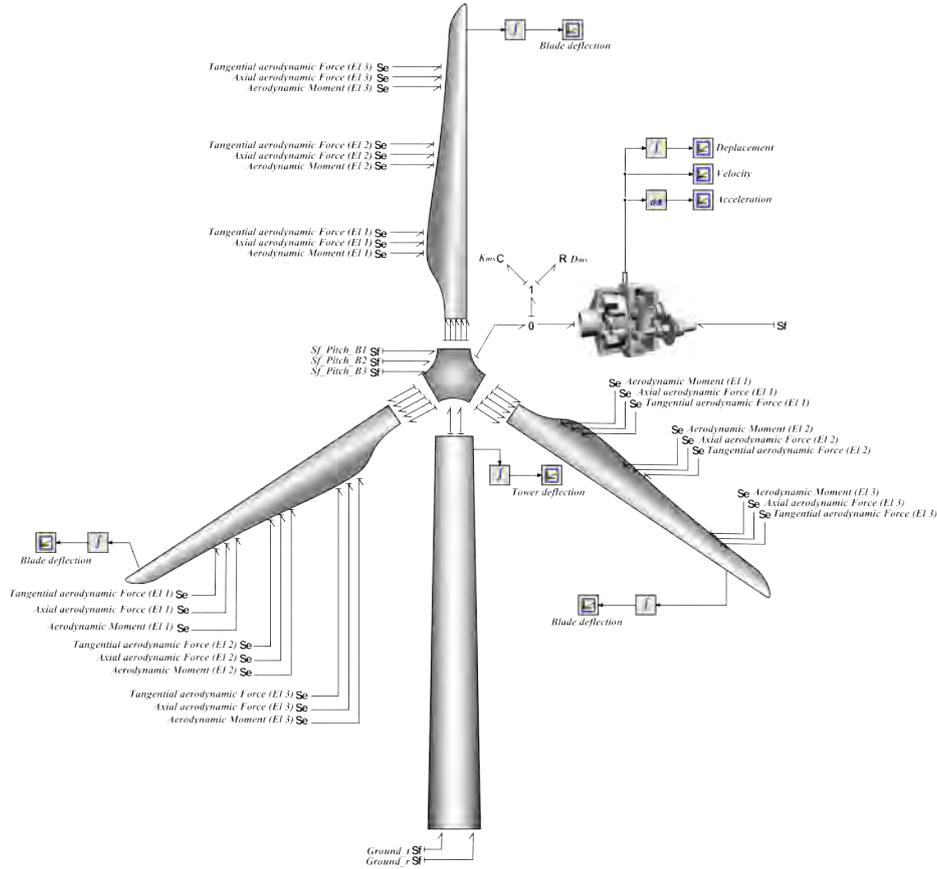


Figure 4.20: Modèle Bond Graph du sous-système mécanique.

- Il n'y a pas d'interférence entre les éléments adjacents de la pale.
- L'écoulement de l'air autour d'un élément de la pale est considéré comme bidimensionnel.

Les expressions de la force axiale élémentaire dF_T , la force tangentielle élémentaire dF_r et le moment aérodynamique dM_x appliqué sur les pales, en fonction du coefficient de portance C_L , du coefficient de traînée C_D et du coefficient de moment de calage C_m , peuvent être obtenus en considérant l'écoulement de l'air à travers un élément annulaire de rayon r , d'épaisseur dr et de section :

$$dF_T = \frac{1}{2} \rho \frac{V^2 (1-a)^2}{\sin^2 \phi} (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) cdr \quad (4.15)$$

$$dF_r = \frac{1}{2} \rho \frac{V^2 (1-a)^2}{\sin^2 \phi} (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi) cdr \quad (4.16)$$

$$dM_x = \frac{1}{2} \rho \frac{V^2 (1-a)^2}{\sin^2 \phi} [C_m c + y_G (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi) - (z_G - z_a) (C_L \sin \phi - C_D \cos \phi)] cdr \quad (4.17)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{V(1-a)}{\Omega_r r (1+a')} \right) \quad (4.18)$$

Où c est la longueur de corde de l'élément de pale, $\phi = \alpha + \beta$ est l'angle entre la direction locale de l'écoulement et le plan du rotor (Figure 4.21(a), Équation 4.18) avec α est l'angle d'attaque (d'incidence) et β est l'angle de vrillage. Les paramètres impliqués dans ces expressions sont représentés graphiquement sur la Figure 4.21(a), y_G et z_G sont les coordonnées de centre de gravité de l'élément de la pale, z_A est la coordonnée du centre aérodynamique comme la montre la Figure 4.21(b). Les coefficients C_L , C_D et C_m sont fonction de l'angle d'attaque α et ils dépendent de profile des pales. La

Figure 4.22 présente la variation de ces coefficients en fonction de l'angle d'attaque α pour le profil de NACA 4415.

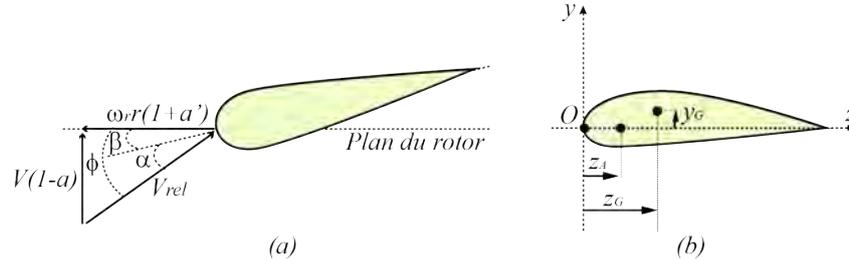


Figure 4.21: Section d'un élément de la pale à un rayon r .

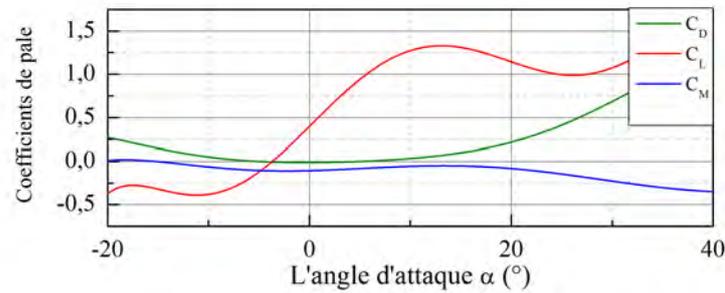


Figure 4.22: Coefficients C_D , C_L et C_m de la pale pour le profil NACA 4415.

La combinaison de ces deux approches a permis de résoudre les équations des efforts aérodynamiques par méthode itérative.

Les Équations 4.13 et 4.15 sont utilisées pour calculer le facteur d'interférence axiale comme :

$$a = \left(1 + \frac{4\sin^2\phi}{\sigma'(C_L\cos\phi + C_D\sin\phi)}\right)^{-1} \quad (4.19)$$

Les Équations 4.14 et 4.16 sont utilisées pour calculer le facteur d'interférence axiale comme :

$$a' = \left(-1 + \frac{4\sin\phi\cos\phi}{\sigma'(C_L\sin\phi - C_D\cos\phi)}\right)^{-1} \quad (4.20)$$

Les valeurs de a et a' ne peuvent être trouvées directement à partir de ces équations. La méthode utilisée consiste à calculer les valeurs des facteurs d'interférence axiale et tangentielle pour chaque position r de la pale. Puisqu'il n'existe pas d'expressions analytiques pour ces facteurs, une méthode itérative est utilisée. Elle se résume par les étapes suivantes :

1. On donne la valeur de r_i qui détermine la position de centre de gravité de i^{eme} élément de pale par rapport au centre de l'hélice, où ce calcul sera effectué.
2. On suppose des valeurs initiales raisonnables pour a_i et a'_i . Une technique efficace consiste à supposer que l'angle d'entrée est petit tel que $\sin\phi_i \approx \phi_i$, le facteur d'interférence tangentielle a'_i et le coefficient de traînée C_{D_i} sont nuls. Le coefficient de portance est $C_{L_i} = 2\pi\alpha_i$. Après quelques substitutions on peut trouver que :

$$a_i = \frac{1}{4} \left(2 + \pi\lambda_{r_i}\sigma'_i - \sqrt{4 - 4\pi\lambda_{r_i}\sigma'_i + \pi\lambda_{r_i}^2\sigma'_i(8\beta_i + \pi\sigma'_i)}\right) \quad (4.21)$$

Avec : $\lambda_{r_i} = \omega_r r_i / V$ est le rapport de vitesse locale et $\sigma'_i = c_i / (2\pi r_i)$ est la solidité locale.

3. On calcule ϕ à l'aide de l'équation suivante.

$$\phi_i = \tan^{-1}\left(\frac{V(1 - a_i)}{\omega_r r_i (1 + a'_i)}\right) \quad (4.22)$$

4. On calcule α_i à l'aide de la formule $\alpha_i = \phi_i - \beta_i$.

5. On détermine $C_L(\alpha)$ et $C_D(\alpha)$ pour l'angle calculé α par une méthode d'approximation en utilisant les caractéristiques du profil utilisé.

6. On calcule a et a' en utilisant les formules suivants.

$$a_i = \left(1 + \frac{4 \sin^2 \phi_i}{\sigma'_i (C_{L_i} \cos \phi_i + C_{D_i} \sin \phi_i)}\right)^{-1} \quad (4.23)$$

$$a'_i = \left(-1 + \frac{4 \sin \phi_i \cos \phi_i}{\sigma'_i (C_{L_i} \sin \phi_i - C_{D_i} \cos \phi_i)}\right)^{-1} \quad (4.24)$$

7. On compare les valeurs de a et a' avec celles précédentes et on répète les étapes 3 à 6 jusqu'à l'obtention de la précision voulue. La convergence de a et a' veut dire que l'égalité des résultats obtenus par les deux théories est vérifiée.

8. On calcule F_{T_i} , F_{r_i} et M_{x_i} par :

$$F_{T_i} = \frac{1}{2} \rho \frac{V^2 (1 - a_i)^2}{\sin^2 \phi_i} (C_{L_i} \cos \phi_i + C_{D_i} \sin \phi_i) c_i l_i \quad (4.25)$$

$$F_{r_i} = \frac{1}{2} \rho \frac{V^2 (1 - a_i)^2}{\sin^2 \phi_i} (C_{L_i} \sin \phi_i - C_{D_i} \cos \phi_i) c_i l_i \quad (4.26)$$

$$M_{x_i} = \frac{1}{2} \rho \frac{V^2 (1 - a_i)^2}{\sin^2 \phi_i} [C_{m_i} c_i + y_{G_i} (C_{L_i} \cos \phi_i + C_{D_i} \sin \phi_i) - (z_{G_i} - z_{a_i}) (C_{L_i} \sin \phi_i - C_{D_i} \cos \phi_i)] c_i l_i \quad (4.27)$$

Avec l_i est la longueur de i^{eme} élément.

Dans la partie aérodynamique, nous avons besoin de trouver un moyen pour convertir la vitesse du vent en un effort aérodynamique, à savoir transformer un flux à un effort. Cela se fait au moyen d'un élément gyrateur modulé (MGY) du Bond Graph (l'élément MGY est utilisé parce que le rapport du gyrateur est un paramètre variable). Afin de simuler le comportement aérodynamique de la pale, les Équations 4.21 à 4.27 sont intégrés dans l'élément MGY. Dans ce cas, la transformation dépend de trois variables d'entrée : l'angle de calage β , la vitesse du vent V et la vitesse de rotation du rotor ω_r . Le modèle Bond Graph du sous-système aérodynamique est représenté sur la Figure 4.23.

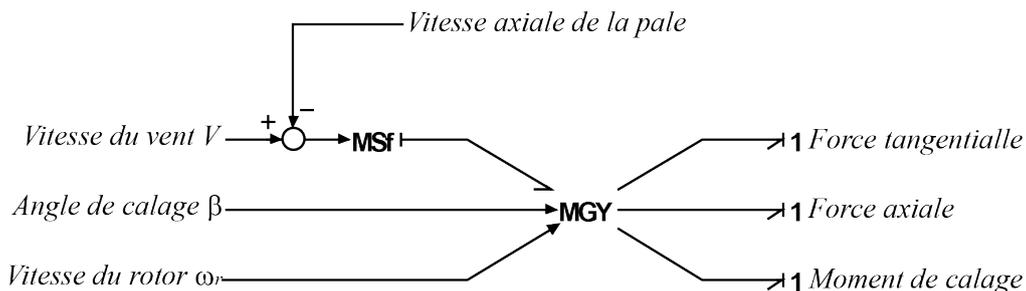


Figure 4.23: Modèle Bond Graph du sous-système aérodynamique.

Pour valider le modèle aérodynamique, une simulation du coefficient de puissance C_p est faite. Ce paramètre caractérise les turbines éoliennes. Il représente la fraction de la puissance extraite par la turbine de la puissance disponible dans le vent. Il peut être écrit comme :

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \tag{4.28}$$

La valeur maximale théorique C_{pmax} de ce coefficient pour un rotor idéal, dite limite de Betz, peut être trouvée en fixant la dérivée de C_p par rapport à a est égal à zéro, ce qui conduit à: $a = 1/3$ et $C_{pmax} = 0,596 = 59,6\%$ qui correspond à l'efficacité maximale possible pour une éolienne idéale.

Pour faire cette simulation, nous connectons les éléments MGY avec la pale comme la montre la Figure 4.24, puis nous fixons la vitesse du vent à une valeur constante égale à $12m/s$, ensuite nous appliquons une rampe de pente égale à 1 pour la vitesse de rotation du rotor ω_r , après nous simulons le modèle pour trois valeurs de β (2° , 4° et 6°), enfin nous calculons C_p par l'Équation 4.29 puis nous affichons les résultats de C_p en fonction du λ ($\lambda = r\omega_r/V$) comme la montre la Figure 4.25.

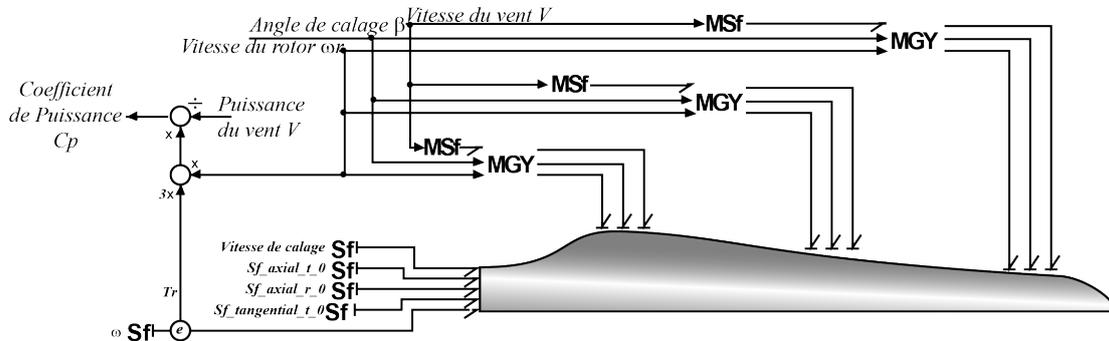


Figure 4.24: Modèle de simulation du C_p .

$$C_p = \frac{3T_r\omega_r}{\frac{1}{2}\rho\pi R^2V^3} \tag{4.29}$$

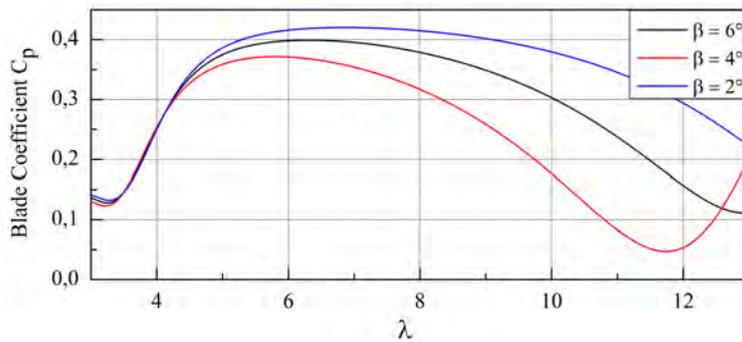


Figure 4.25: Courbe de C_p en fonction de λ .

À partir de la Figure 4.25 on observe que la valeur maximale de C_p est égale à 0.42, en pratique, la valeur maximale de C_p peut attendre pour une turbine éolienne est égale à 0.5. La différence entre ces deux valeurs (0.42 et 0.5) est acceptable, en plus, il est mieux que la valeur attendre en [128] (environ 0.33). Cette simulation valide le comportement du sous-système aérodynamique en relation avec le sous-système mécanique.

4.2.3 Modélisation de sous-système électrique

Fondamentalement, l'énergie est produite sous forme mécanique et consommée sous forme électrique. Les générateurs à induction (par exemple machine asynchrone) sont des machines électriques

les plus populaires dans l'industrie éolienne pour convertir de l'énergie mécanique en énergie électrique par l'intermédiaire d'une énergie magnétique. La pluridisciplinarité de cette machine augmente la complexité de sa modélisation. Par conséquent, pour un contrôle efficace de l'énergie électrique de la machine à induction une modélisation précise est nécessaire [141].

Le modèle bond graph de la machine asynchrone a été développé dans plusieurs publications [142, 143, 144], avec différentes caractéristiques.

On distingue deux approches de modélisation pour la machine asynchrone : d'un côté les modèles qui utilisent le repère naturel (abc) et de l'autre les modèles avec l'utilisation de la transformation de Park. Le choix de modèle dépend du type d'analyse qu'on désire conduire sur le système. Il est important de mentionner que les modèles qui utilisent la transformation de Park sont les plus utilisés (modèles linéaires), car une analyse linéaire (lieu de pôles par exemple) peut être mise en œuvre d'une manière plus facile. Dans ce chapitre nous utilisons le repère naturel, le repère de Park sera utilisé dans le chapitre suivant l'ordre de la commande de la génératrice asynchrone.

Le modèle Bond Graphe de la machine asynchrone est issu de [134] dans la référence naturelle est esquissé dans la Figure 4.26. Le modèle est découpé en trois parties : le stator, le rotor et la partie mécanique du générateur.

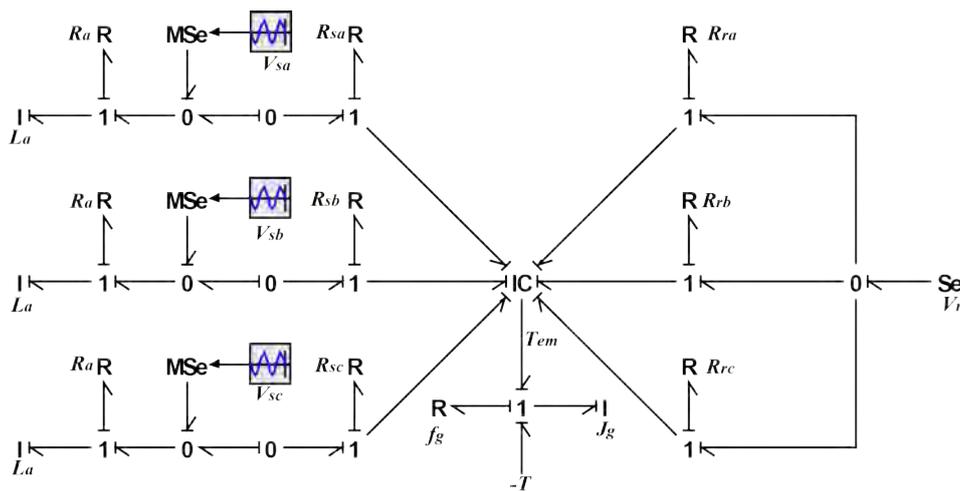


Figure 4.26: Représentation Bond Graph de la machine asynchrone.

Les tensions d'entrée du stator dans les phases a , b et c sont représentées par des sources d'efforts modulés ($MSe = V_{si}$ avec ($i = a, b$ ou c)). Les résistances des bobines (R_{si} ($i = a, b$ ou c)), traduisant les pertes dans chaque phase du stator, sont représentées par des éléments R du Bond Graph. Les tensions d'entrée et les résistances du stator sont connectées à des jonctions 1, les courants (i_{si} avec ($i = a, b$ ou c)) générés par le générateur peuvent être mesurés à ces jonctions.

Le port d'énergie du rotor est similaire au port d'énergie du stator. Les pertes dans le rotor sont représentées par des éléments R (R_{ri} avec ($i = a, b$ ou c)). Les tensions d'entrée du rotor sont mises en évidence par une source d'effort égale à zéro.

Les inductances propres (L_s, L_r) et mutuelles (L_m) entre le stator et rotor sont regroupées dans l'élément multiport IC. En effet, l'usage d'un élément multiport du type IC est justifié par le fait que le multiport contient des relations de sinus et cosinus (Équation 4.33), pour lesquelles il est nécessaire de calculer la position ou l'angle du rotor dans la partie mécanique (Équation 4.35). Donc, la vitesse de la machine est intégrée pour trouver θ_m . De cette manière, à l'intérieur de l'élément IC, sont programmés les expressions 4.30 et 4.35. Dans le Bond Graph, le couplage entre les grandeurs statoriques et rotoriques est représenté par les équations 4.30, 4.31 et 4.32.

$$\begin{pmatrix} \phi_{a,b,cs} \\ \phi_{a,b,cr} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_S & L_S \\ L_M^T & L_R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{a,b,cs} \\ i_{a,b,cr} \end{pmatrix} \quad (4.30)$$

Avec L_S et L_R égales à :

$$L_S = \begin{pmatrix} L_{IS} + L_{MS} & -\frac{1}{2}L_{MS} & -\frac{1}{2}L_{MS} \\ -\frac{1}{2}L_{MS} & L_{IS} + L_{MS} & -\frac{1}{2}L_{MS} \\ -\frac{1}{2}L_{MS} & -\frac{1}{2}L_{MS} & L_{IS} + L_{MS} \end{pmatrix} \quad (4.31)$$

$$L_R = \begin{pmatrix} L_{IR} + L_{MR} & -\frac{1}{2}L_{MR} & -\frac{1}{2}L_{MR} \\ -\frac{1}{2}L_{MR} & L_{IR} + L_{MR} & -\frac{1}{2}L_{MR} \\ -\frac{1}{2}L_{MR} & -\frac{1}{2}L_{MR} & L_{IR} + L_{MR} \end{pmatrix} \quad (4.32)$$

Et l'inductance mutuelle est donnée par :

$$L_M = L_{SR} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \quad (4.33)$$

Dans les expressions 4.31 et 4.32, L_{MS} et L_{MR} sont les inductances de magnétisation ou mutuelles du stator et du rotor respectivement, L_{IS} et L_{IR} sont les inductances propres du stator et du rotor ; et dans l'Équation 4.33, L_{SR} est l'inductance mutuelle entre le stator et le rotor et θ ($= \theta_g$) est l'angle de position du rotor de générateur.

La partie mécanique est composée de l'inertie du rotor J_g , du frottement mécanique f_g , du couple de charges T et du couple électromagnétique T_{em} en accord avec :

$$J_g \frac{d}{dt} \omega_g = T_{em} - T - f_g \omega_g \quad (4.34)$$

Où ω_g est la vitesse du rotor du générateur. Le couple électromagnétique est représenté en fonction des courants du stator et du rotor et des dérivées des inductances mutuelles entre le stator et rotor, par l'Équation 4.35.

$$T_e = \begin{pmatrix} i_{sa} & i_{sb} & i_{sc} \end{pmatrix} \frac{d}{d\theta_m} (L_M(\theta_m))_{3 \times 3} \begin{pmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{pmatrix} p \quad (4.35)$$

Le modèle de la Figure 4.27 peut représenter le sous-système électrique de la turbine éolienne.

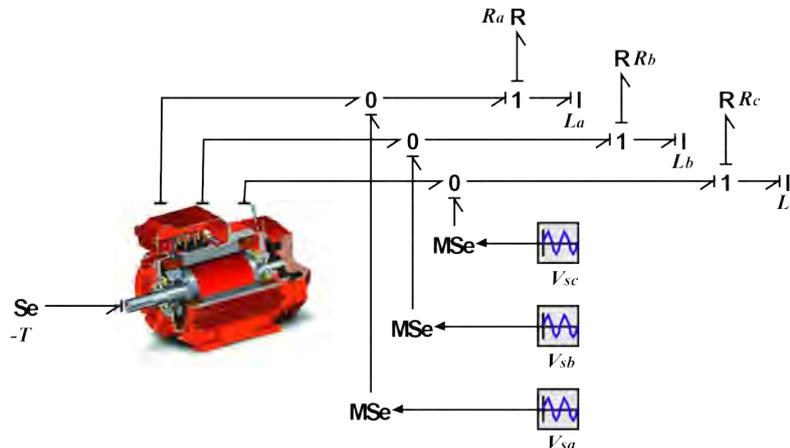


Figure 4.27: Modèle Bond Graph du sous-système électrique.

Une simulation est effectuée pour vérifier le comportement du modèle. Afin de permettre une connexion directe au réseau électrique, un élément RL est utilisé en tant que charge connectée en série entre le générateur et le réseau électrique triphasé. L'annexe A contient l'ensemble des paramètres de ce modèle.

Les courbes des courants de stator et la vitesse du générateur sont présentées sur la Figure 4.28. Il est important d'indiquer que dans cette simulation la machine électrique est utilisée comme un moteur, parce qu'un couple positif est appliqué. L'objectif est de montrer que le modèle fonctionne comme prévu. Dans la section suivante, il sera connecté comme un générateur ayant un couple négatif.

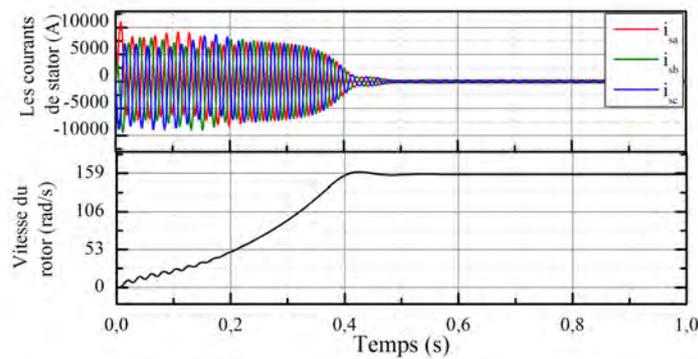


Figure 4.28: Simulation du sous-système électrique.

4.2.4 Modélisation de sous-système de calage.

Le modèle du sous-système de calage a été abordé dans le chapitre 3 (section 3.2.4), mais dans ce modèle, la pale est modélisée par une simple masse-ressort-amortisseur. Dans le présent chapitre, le modèle de la pale est plus détaillé. Le modèle du système de calage doit être connecté au modèle de la pale présenté dans la section de modélisation du sous-système mécanique dans la direction de la torsion (Figure 4.7). Par conséquent le modèle Bond Graph du système de calage est représenté sur la Figure. Les détails de ce modèle sont présentés dans le chapitre 3.

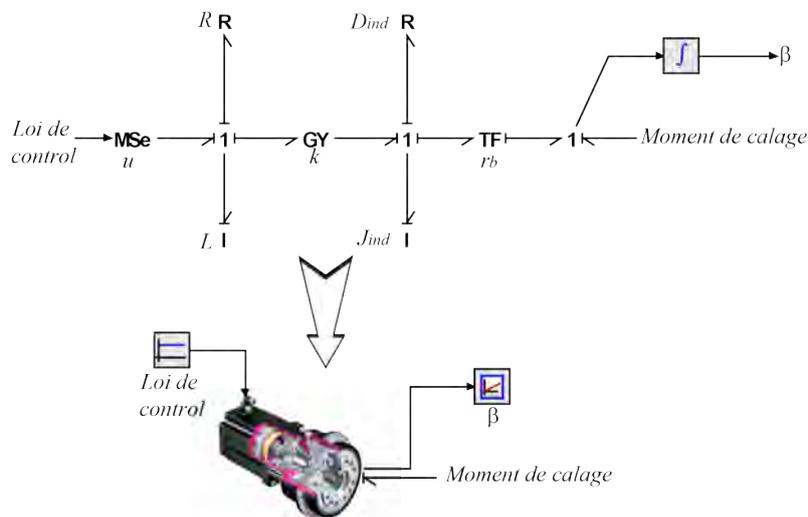


Figure 4.29: Modèle Bond Graph du sous-système calage.

4.2.5 Modélisation de système complet

Les sous-systèmes individuels présentés dans les sections précédentes sont combinés entre eux comme la montre la Figure 4.30. Les trois entrées du sous-système aérodynamique sont reliées par les sources de vent, la vitesse du rotor et l'angle de calage, cette dernière représentant la primitive de la vitesse de rotation de la pale à la sortie du sous-système de calage. Les trois forces de sortie du sous-système aérodynamique symbolisent les entrées du sous-système mécanique, qui sont appliquées sur chaque élément de pale. La sortie du sous-système mécanique est la puissance mécanique, qui représente l'entrée du sous-système électrique. Le réseau d'alimentation relie la sortie du sous-système électrique. Pour avoir un échange de la puissance, une charge est connectée entre le générateur et le réseau d'alimentation. La sortie du sous-système de calage est connectée avec le modèle de moment de calage du sous-système mécanique, et son entrée est la loi de commande pour contrôler l'angle de calage. Les différentes lois de commande ne sont pas traitées dans le présent chapitre. Un modèle plus détaillé sera présenté dans le chapitre suivant. En fait, certaines considérations sont nécessaires pour permettre à l'éolienne de fonctionner sans contrôleur. Ces hypothèses sont les suivantes :

- La vitesse du vent ne dépasse jamais sa valeur nominale, cela permet à l'éolienne de fonctionner sans contrôle de l'angle de calage.
- Une charge est connectée entre le générateur et le réseau d'alimentation, pour avoir un échange d'énergie. En fait, cette considération permet à l'éolienne de fonctionner sans contrôleur de la vitesse, cependant la vitesse de rotation du générateur dépend de la fréquence de réseaux et le nombre de pôles de la machine. Autrement dit, la vitesse de rotation est imposée par le générateur.

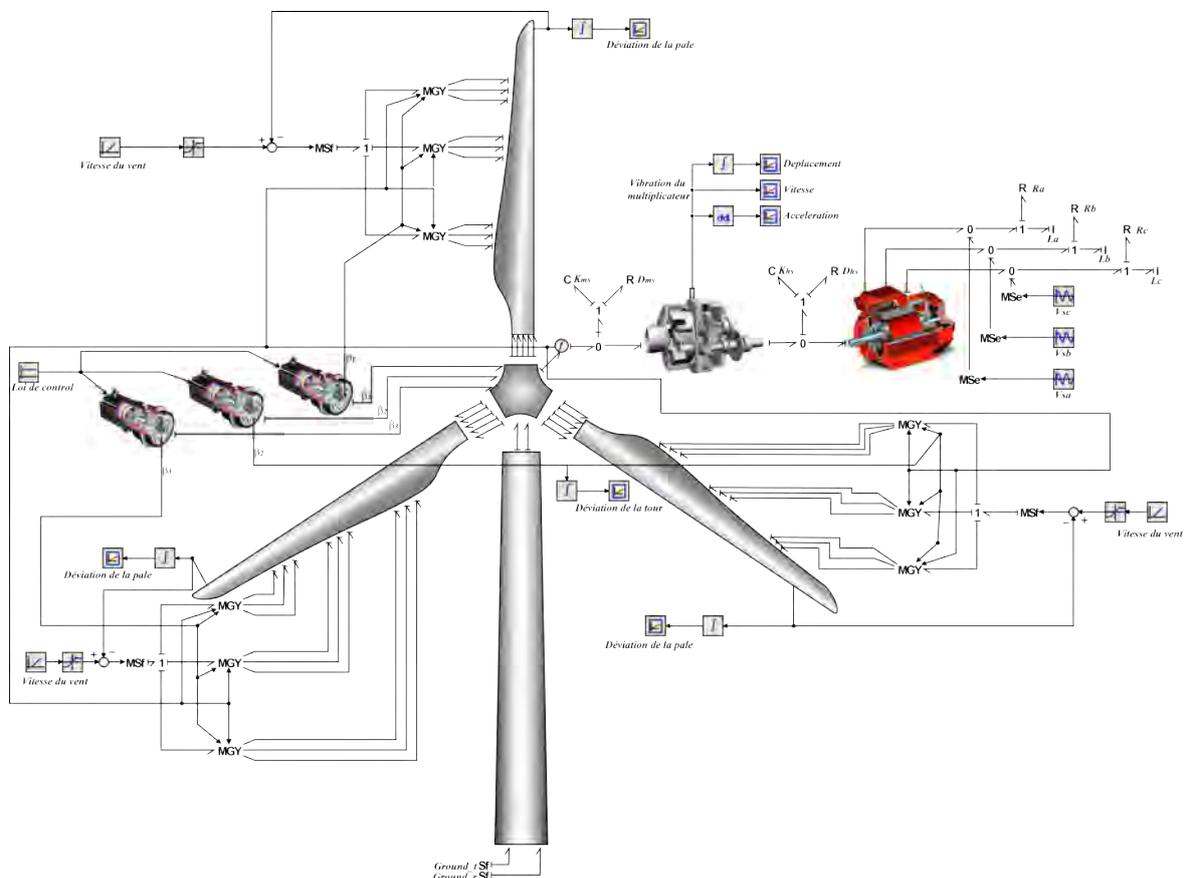


Figure 4.30: Modèle Bond Graph complet de la turbine éolienne.

4.3 Simulation et discussion

Pour exposer le comportement du modèle Bond Graph complet de la turbine éolienne, deux simulations différentes ont été réalisées. Un profil de vent constant et un autre variable dans le domaine temporel sont considérés afin d'analyser les interactions entre les différents sous-systèmes de l'éolienne. Le scénario de simulation pour le vent constant est le suivant (Figure 4.32) : une vitesse de vent constant de $5m/s$ est appliquée au début de la simulation, puis, à $t = 10s$, une rampe de vent est appliquée. Cette rampe du vent augmente de $5m/s$ jusqu'à $13m/s$ (vitesse nominale de la turbine étudiée), à partir $t = 10s$ jusqu'à $t = 50s$, cette valeur ($13m/s$) est maintenue jusqu'à la fin de la simulation (les lois de contrôle ne sont pas utilisées pour la simulation).

Les figures suivantes montrent le scénario de simulation de l'ensemble du système de conversion éolienne pour les profils du vent constant et variable. La Figure 4.31 représente les trois forces aérodynamiques appliquées au centre de gravité de chaque élément de pale, à partir de $t = 50s$ à $t = 100s$. Les forces aérodynamiques tangentielles appliquées pour chacun des éléments sont les suivants : $F_{t1} = 1,45kN$, $F_{t2} = 1,5kN$ et $F_{t3} = 1,2kN$. Et la position du centre de gravité de chaque élément est : $r_1 = 3,9m$, $r_2 = 11,7m$, $r_3 = 19,5m$. En effet, le couple du rotor des trois pales doit être égale : $T_r = 3 * \sum_{i=1}^3 F_{ti}r_i = 139815kNm$, ce qui est vérifié comme représenté sur la Figure 4.32 où la valeur du couple de $t = 50s$ à $t = 100s$ est : $T_r = 140,067kNm$. Le système subit des oscillations au début de la simulation, qui sont dues à des comportements dynamiques du système dans la phase transitoire. La Figure 4.32 montre également le couple et la vitesse de rotation sur l'arbre du rotor et du générateur, de $t = 50s$ à $t = 100s$, les couples sur l'arbre du rotor et du générateur sont respectivement $T_r = 140,067kNm$ et $T_g = 2.334kNm$ et les vitesses de rotation sur l'arbre du rotor et du générateur sont respectivement $\omega_r = 3.2red/s$ et $\omega_g = 192.1red/s$. Le rapport entre les couples (T_r/T_g) et les vitesses (ω_g/ω_r) prouve que la relation entre l'arbre de rotor et de générateur confirme le rapport de multiplicateur de vitesses qui est égal à 60.

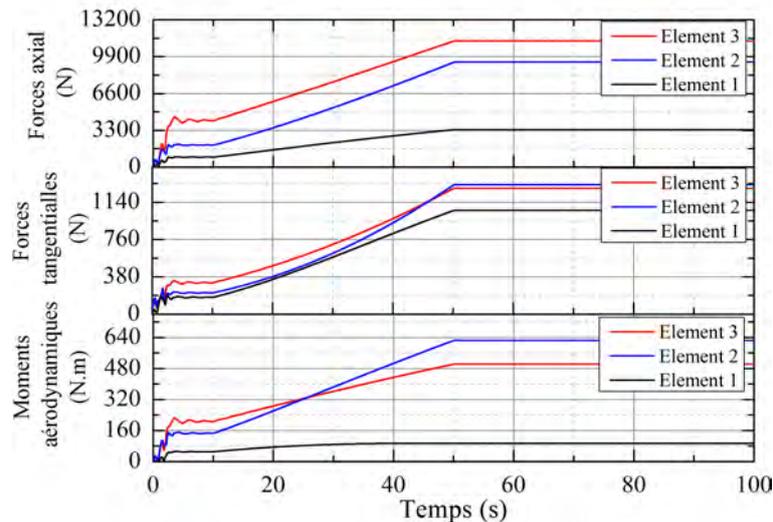


Figure 4.31: Efforts aérodynamiques (profil constant).

Les tensions utilisées comme une entrée du sous-système électrique à une valeur efficace de $490V$. La Figure 4.33 montre les courants de stator.

La turbine éolienne convertit de l'énergie éolienne en énergie mécanique puis en énergie électrique, puis distribuée à la charge ou au réseau d'alimentation. La Figure 4.34 montre la puissance aérodynamique, mécanique et électrique dans le modèle de turbine éolienne. La puissance mécanique est égale à $739kW$ et la puissance active du générateur est de $733kW$. Ces deux valeurs sont proches de la

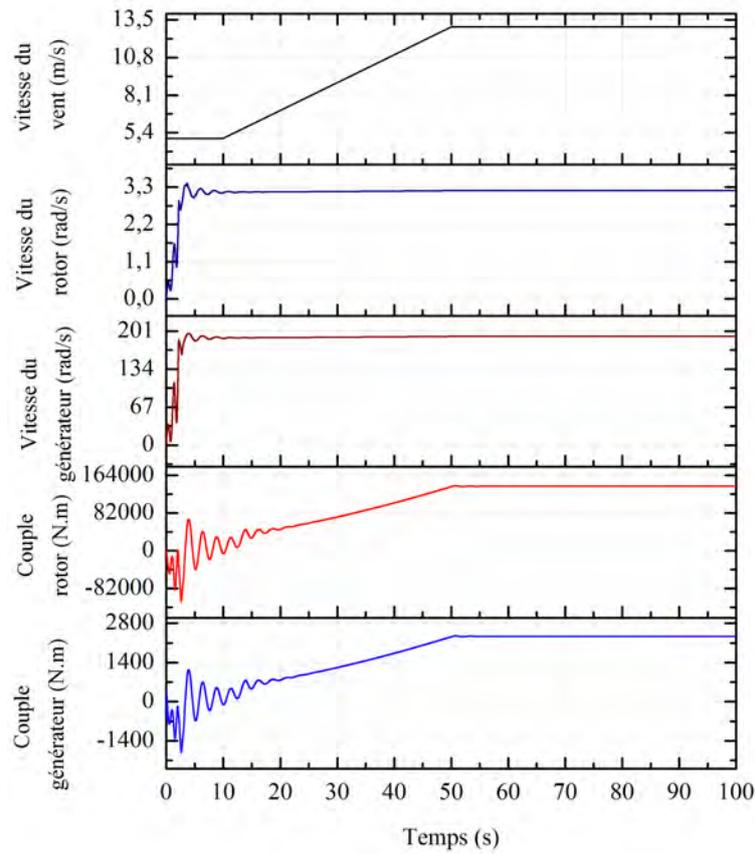


Figure 4.32: Vitesses et couples (profil constant).

puissance nominale de la turbine qui est égale à $750kW$ (la puissance correspond à la vitesse du vent nominale), la différence entre ces valeurs est due à la puissance perdue dans le sous-système mécanique et dans le générateur.

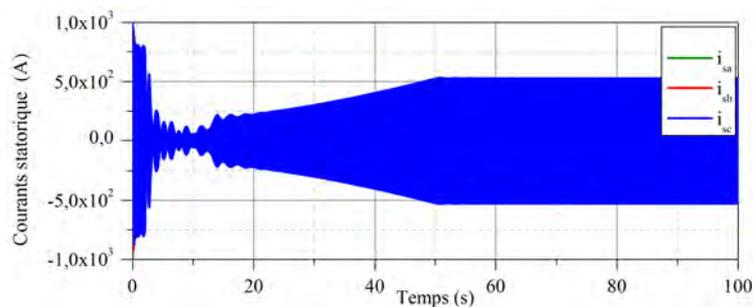


Figure 4.33: Courants statorique (profil constant).

La Figure 4.35 montre également les valeurs classiques de C_p et λ . La Figure 4.36 esquisse la déviation de la pale et de la tour, et la vibration du multiplicateur. La déviation maximale de la tour et de la pale sont respectivement de l'ordre de $0,2m$ et $0,45m$, cette dernière valeur (déviation de la pale ($0.45m$)) prend en compte la déviation de la tour, car nous supposons que le sommet de la tour et le fond de la pale dans la direction axiale sont solidaires. Par conséquent, la déviation réelle de la pale est de l'ordre de $0,25m$. L'amplitude de vibration du multiplicateur de vitesses entre $\pm 0,004m$. Ces valeurs sont acceptables dans le cas où le profil du vent proposé est autour de sa valeur nominale. Dans le cas de grande vitesse du vent, un système de contrôle est nécessaire pour maintenir le système

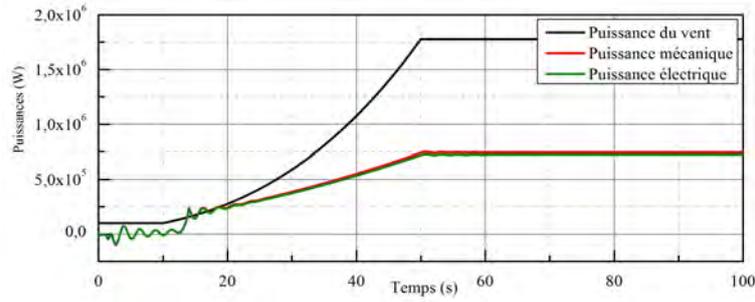


Figure 4.34: Puissances (profil constant).

de structure et la vibration du multiplicateur de vitesses autour de ses valeurs nominales.

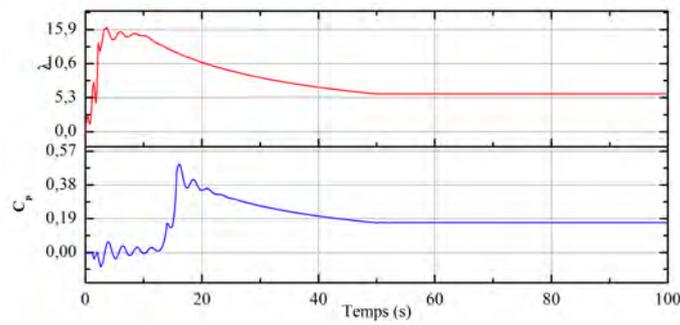


Figure 4.35: C_p et λ (profil constant).

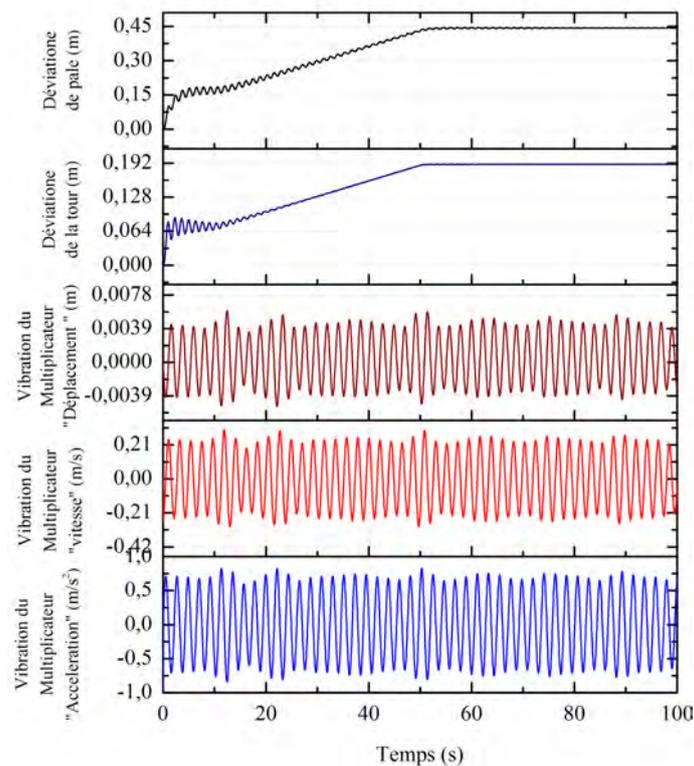


Figure 4.36: Déviation des pales et la tour et les vibrations de multiplicateur (profil constant).

La deuxième simulation est effectuée en utilisant une vitesse de vent variable autour de la vitesse du vent nominale de la turbine. Les Figures 4.37-4.42 montrent les réponses de simulation pour les variables sélectionnées. Les valeurs de couple et de vitesse, C_p et λ sont pris à leurs valeurs moyennes. Il est révélé que les réponses de chaque variable varient avec la vitesse du vent. Cela permet la vérification du comportement du modèle proposé. Il est souligné que les courants et les puissances sont des fonctions de la vitesse du vent.

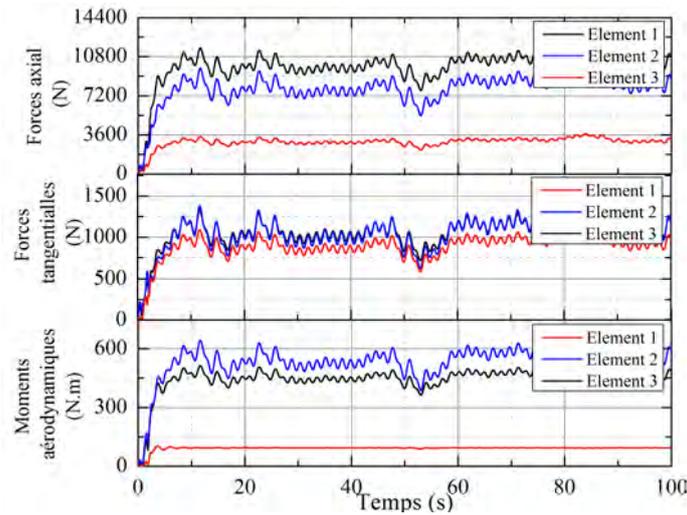


Figure 4.37: Efforts aérodynamiques (profil variable).

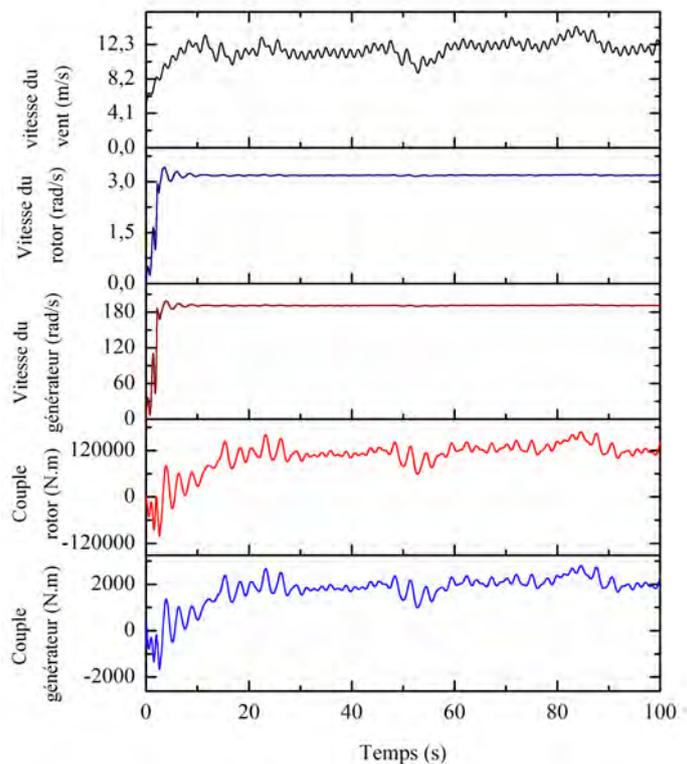


Figure 4.38: Vitesses et couples (profil variable).

Cette contribution a été basée sur des données réelles pour une éolienne de 750 kW, tous les paramètres du système sont présentés à l'annexe A.

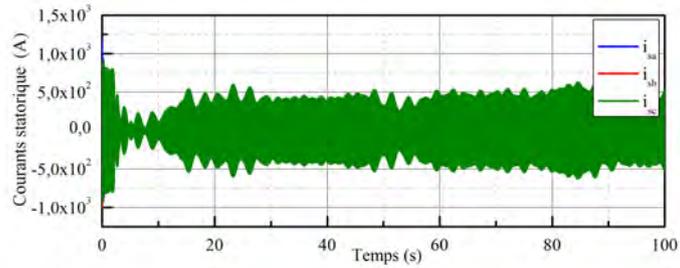


Figure 4.39: Courants statorique (profil variable).

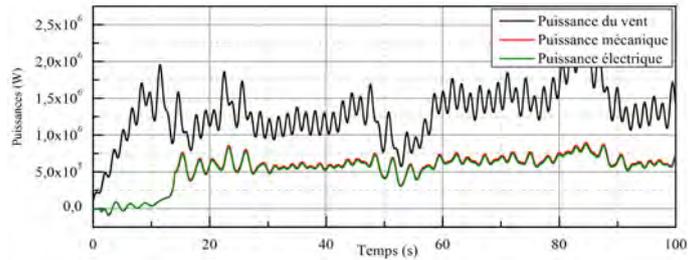


Figure 4.40: Puissances (profil variable).
[h.]

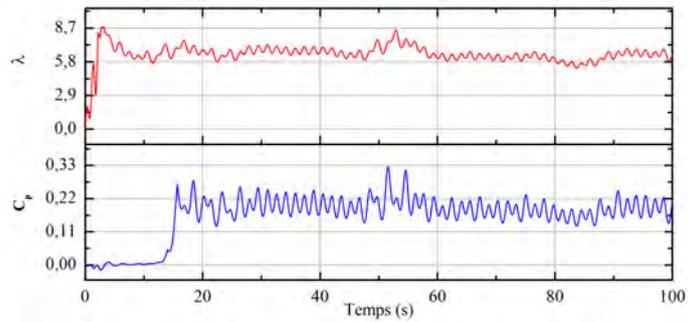


Figure 4.41: C_p et λ (profil variable).

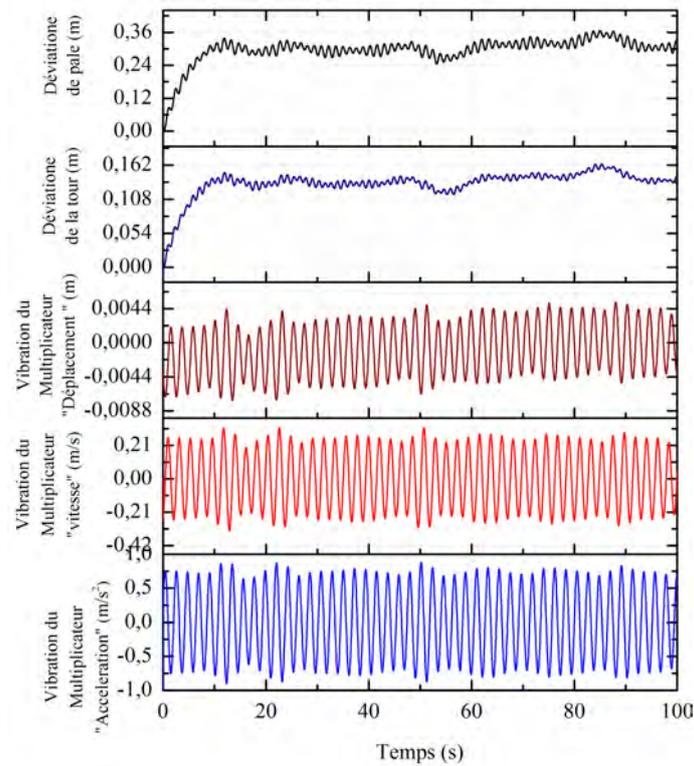


Figure 4.42: Déviation des pales et la tour et les vibrations de multiplicateur (profil variable).

4.4 Conclusion

En raison des interactions entre le sous-système aérodynamique, le sous-système mécanique et le sous-système électrique, une modélisation mécatronique d'un système de génération éolienne en utilisant l'approche Bond Graph est proposée pour analyser le comportement dynamique de ce système. Au moyen de modèle proposé, le calcul correct de la charge sur différentes parties du système peut être réalisé.

Certaines contributions ont utilisé l'approche Bond Graph pour la modélisation de la turbine, mais ils impliquent seulement une partie de l'éolienne, par exemple le multiplicateur de vitesse dans [132] ou de la pale dans [127]. D'autres [145, 146] ont modélisé les parties principales de la turbine éolienne, mais les modèles ne sont pas assez détaillés. Ce "déficit" a été apparemment rempli dans [134], mais la déformation axiale de la pale, la flexion de la tour, la vibration du multiplicateur et le système de calage n'ont pas été pris en compte.

Ce travail de recherche met en évidence le fait que toutes ces parties sont considérées pour construire un modèle intégré. Ce modèle décrit en profondeur le comportement réel de la turbine. Il décrit les phénomènes dynamiques les plus importants que l'on peut rencontrer dans le système. Nous avons essayé de souligner que le Bond Graph fournit une meilleure compréhension de ce qui se passe réellement dans le système.

Après la simulation avec la vitesse du vent constant et variable, de bons résultats ont été obtenus avec le modèle proposé, mais les comparaisons avec des mesures réelles ne sont pas disponibles à ce stade.

Le présent modèle peut être utilisé pour déterminer les charges sur le train d'entraînement de

l'éolienne pendant le processus de simulation, et de calculer la déviation de la pale et de la tour, puis de développer des algorithmes de contrôle pour minimiser ces déviations. Le modèle peut également fournir des informations sur la vibration du multiplicateur de vitesse, ainsi que de dimensionner les composants du système de calage. Par ailleurs, il est possible d'utiliser ce modèle pour l'optimisation de comportement dynamique de système. Il est également efficace pour tester de nouvelles stratégies de contrôle des éoliennes.

Seules quelques publications impliquant toutes les étapes de la turbine éolienne sont disponibles dans la littérature. Dans ce contexte, le modèle proposé ici est un apport de départ pour l'analyse de ce système complexe.

Basé sur les résultats dans le présent chapitre, le chapitre suivant traite de la conception de commande en utilisant le concept du Bond Graph bicausal, et par la suite, la construction d'un modèle complet de l'éolienne.

Commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur Une MADA

5.1 Introduction

Aujourd'hui, les éoliennes à vitesse variable sont de plus en plus utilisées par rapport à celles à vitesse constante, et la Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) est la machine à vitesse variable la plus couramment utilisée dans des unités de production supérieure à 1MW. Son principal intérêt est qu'elle peut fournir de la puissance active au réseau par le stator et par le rotor. Ainsi, la production ou l'absorption par le rotor de MADA. Le courant passant au stator a la même fréquence que celui de courant au réseau. Il nous faut donc adapter la fréquence du courant du rotor à celle du réseau pour que le rotor fournisse de la puissance active au réseau. La stratégie utilisée pour cela est l'introduction de deux convertisseurs de puissance interfacés par un bus continu.

Le travail que nous allons présenter dans ce chapitre concerne la modélisation et la commande en couple et puissance d'une génératrice asynchrone à double alimentation entraînée par une turbine éolienne et fonctionnant à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'extraire à tout instant le maximum de la puissance, quelle que soit la vitesse du vent. Dans un premier temps, l'outil Bond Graph est utilisé pour modéliser la MADA, par la suite, nous exposerons les différents développements théoriques relatifs à la commande de la turbine éolienne en utilisant le concept de la bicausalité du Bond Graph en se basant sur le modèle présenté dans le chapitre précédent.

5.2 Description du système

Du point de vue générateur, une turbine éolienne a des configurations différentes. En outre, l'éolienne peut fonctionner soit avec vitesse fixe ou variable. Cette opération dépend directement du type et de la connexion du générateur. Cela signifie que pour une éolienne à vitesse fixe, le générateur est relié directement au réseau d'alimentation, étant donné que la vitesse du rotor est étroitement liée à la fréquence du réseau. En outre, pour une éolienne à vitesse variable, le générateur est contrôlé par l'intermédiaire d'un convertisseur électronique de puissance, qui permet de contrôler la vitesse du rotor.

Chaque configuration a ses propres avantages et ils sont utilisés dans différentes conditions de fonctionnement. Quatre configurations de base sont souvent décrites dans la littérature :

- Éolienne à vitesse fixe avec un générateur à induction.
- Éolienne à vitesse variable avec un générateur à cage ou un générateur synchrone.

- Éolienne à vitesse variable avec un générateur synchrone à plusieurs pôles.
- Éolienne à vitesse variable avec un générateur asynchrone à double alimentation.

Comme il a été mentionné précédemment, le générateur asynchrone à double alimentation (MADA) offre plusieurs avantages pour les éoliennes à vitesse variable. Le stator de la MADA est directement connecté au réseau électrique tandis que le rotor est connecté au réseau via deux convertisseurs statiques bidirectionnels mis en cascade (Figure 4.1). Le principal avantage de cette configuration réside dans le fait que le convertisseur électronique de puissance doit gérer seul une fraction (30%) de la puissance totale [147]. Par conséquent, les pertes dans le convertisseur électronique de puissance peuvent être réduites.

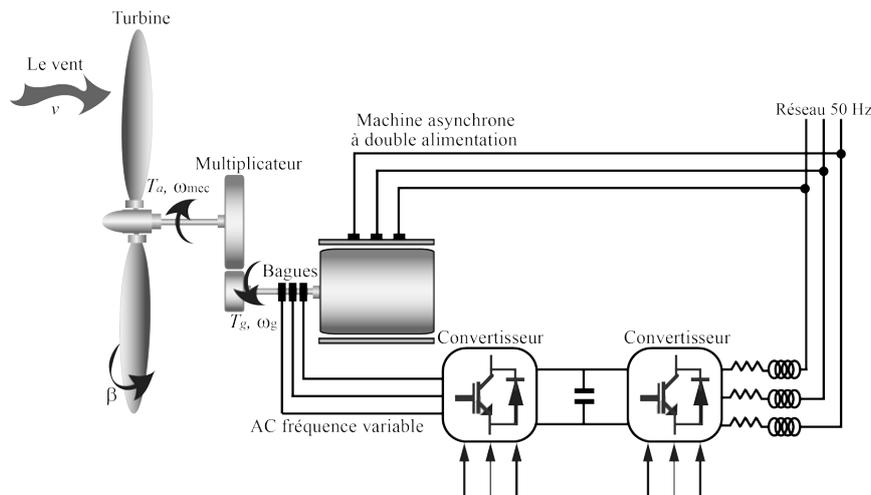


Figure 5.1: Éolienne à vitesse variable avec un générateur asynchrone à double alimentation.

5.3 Modélisation de la MADA

Le modèle de la MADA a été abordé dans de nombreuses publications [148, 149]. On distingue deux approches de modélisation pour la machine asynchrone : d'un côté les modèles qui utilisent le repère naturel (abc) et de l'autre les modèles avec l'utilisation de la transformation de Park (dq). Le choix de modèle dépend du type d'analyse qu'on veut faire sur le système. Le modèle de la machine asynchrone présenté dans le chapitre 4 (Figure 4.26) est présenté dans le repère naturel. Il est important de mentionner que les modèles qui utilisent la transformation de Park sont les plus utilisés (modèles linéaires), car une analyse linéaire peut être mise en œuvre d'une manière plus facile en plus la machine asynchrone à double alimentation à des équations compliquées dans le repère triphasé abc . La complexité provient du fait que la matrice d'inductance mutuelle $[L_m]$ varie même lorsque la vitesse est en régime stationnaire.

Le modèle de la machine asynchrone est basé sur les hypothèses suivantes :

- Nous supposons que le bobinage est réparti de manière à donner une f.e.m. sinusoïdale s'il est alimenté par des courants sinusoïdaux.
- Nous supposons également que nous travaillons en régime non saturé. Nous négligeons les courants de Foucault et l'effet de peau.
- Enfin, le régime homopolaire est nul puisque le neutre n'est pas relié.

Ces choix signifient entre autres que :

- les flux sont additifs,

- les inductances propres sont constantes,
- il y a une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

5.3.1 La transformation de Park

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée-diphasée suivie d'une rotation. Elle permet le passage d'un repère triphasé abs à un modèle mobile biphasé dq (Figure 5.2). Pour chaque ensemble de grandeurs (statoriques et rotoriques), on applique la transformation de Park pour simplifier les équations, et par conséquent, les repères de la transformation de Park des grandeurs statoriques et celle des grandeurs rotoriques doivent coïncider. En effet, si l'on note par θ_s (respectivement par θ_r) l'angle de la transformation de Park des grandeurs statoriques (respectivement rotoriques) (Figure 5.2), ceci se fait en liant les angles θ_s et θ_r par la relation 5.1 avec θ est l'angle de rotation des grandeurs rotoriques par rapport aux grandeurs statoriques.

$$\theta_s = \theta_r + \theta \quad (5.1)$$

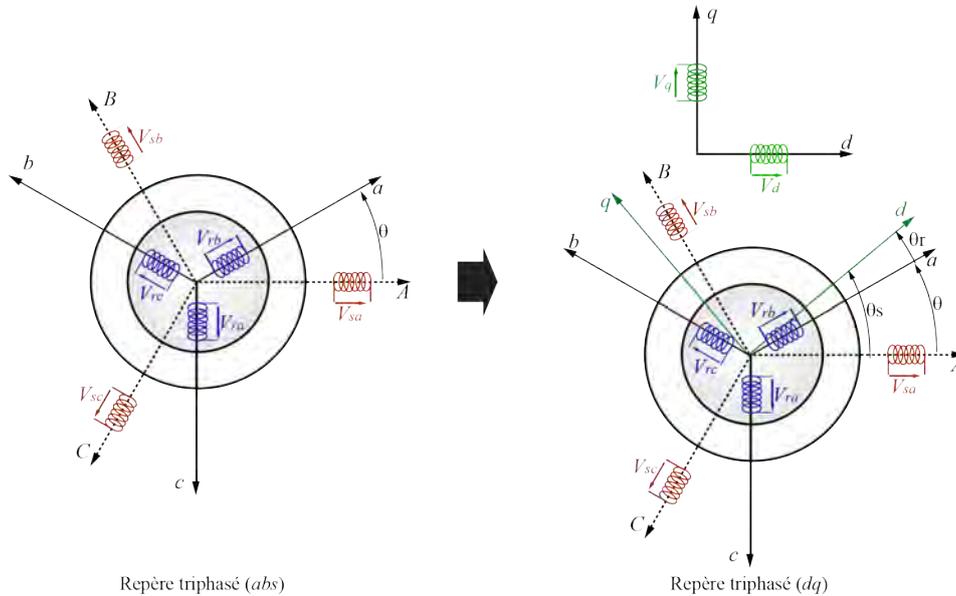


Figure 5.2: Modèle de Park de la MADA.

Le passage d'un référentiel à l'autre se fait par les équations suivantes (à titre d'exemple, la transformation est réalisée sur les tensions statoriques) :

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_0 \end{bmatrix} = [P(\theta_s)] \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = [P^{-1}(\theta_s)] \begin{bmatrix} V_{ad} \\ V_{bd} \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

Avec $[P(\theta_s)]$ est la matrice de passage et $[P^{-1}(\theta_s)]$ sa matrice inverse définies par (Équations 5.4 et 5.5):

$$[P(\theta_s)] = \sqrt{\frac{1}{2}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$[P^{-1}(\theta_s)] = \sqrt{\frac{1}{2}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & -\sin(\theta_s) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Ces équations précédentes peuvent être appliquées aussi pour n'importe quelles autres grandeurs telles que les courants et les flux.

La traduction de cette transformation (Équations 5.2 et 5.3) sous forme d'une représentation Bond graph est illustrée sur la Figure 5.3.

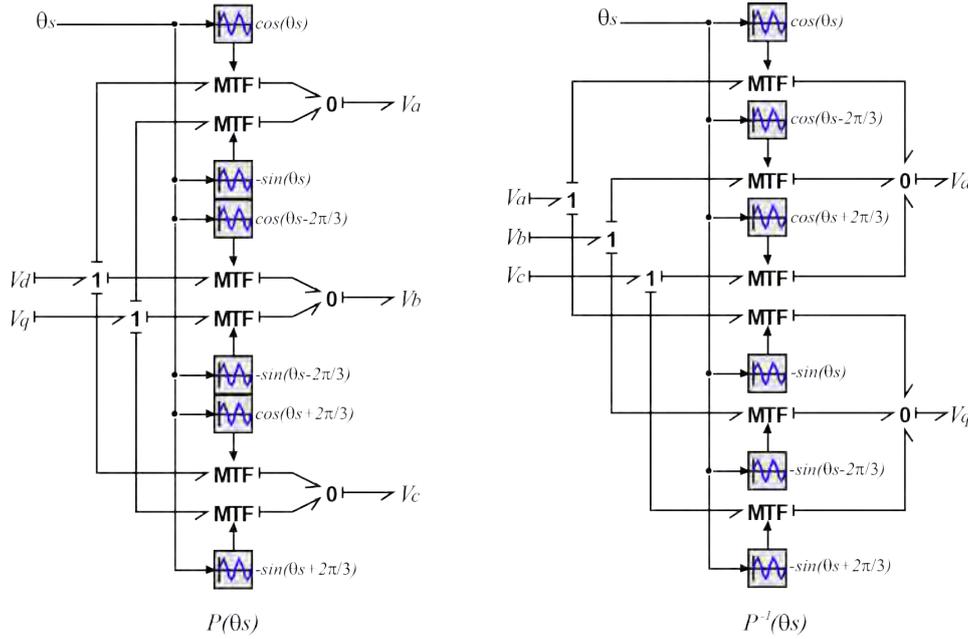


Figure 5.3: Modèle Bond Graph de la transformation de Park.

5.3.2 Modèle Bond Graph de la MADA

Le modèle mathématique de la machine asynchrone est issu de [149]. Il est développé à partir du circuit électrique équivalent de la machine asynchrone dans le repère de Park (Figure 5.4) donné dans [150].

Les équations mathématiques de la machine asynchrone sont :

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \phi_{sq} \quad (5.6)$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \phi_{sd} \quad (5.7)$$

$$v_{s0} = R_s i_{s0} + \frac{d\phi_{s0}}{dt} \quad (5.8)$$

$$v_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \phi_{rq} \quad (5.9)$$

$$v_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \phi_{rd} \quad (5.10)$$

$$v_{r0} = R_r i_{r0} + \frac{d\phi_{r0}}{dt} \quad (5.11)$$

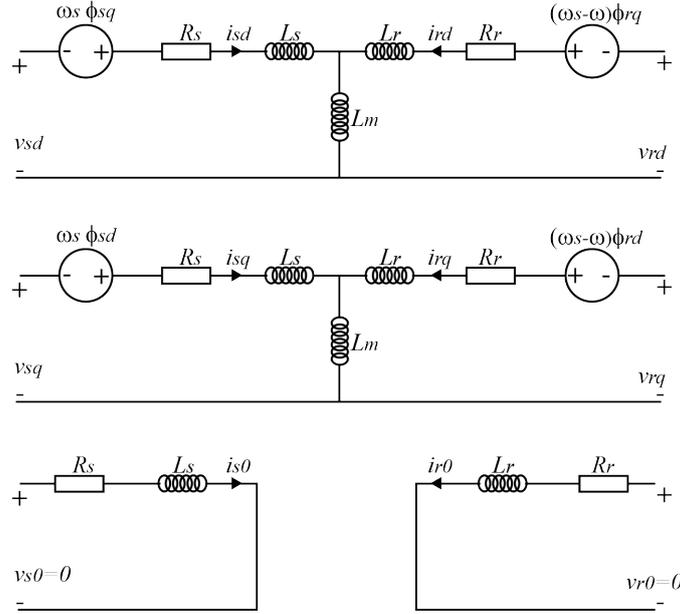


Figure 5.4: Circuit équivalent de la MADA dans le repère de Park.

Où l'indice s correspond au stator, r au rotor et d et q aux variables dans le repère de Park. La fréquence de la tension statorique étant imposée par le réseau électrique, la pulsation des courants rotatifs est donnée par :

$$\omega_r = \omega_s - \omega = \omega_s - p\Omega \quad (5.12)$$

ω_r et ω_s représentent respectivement les pulsations des tensions rotoriques et statoriques en rad/s (avec $\omega_s = 2\pi f$, et f étant la fréquence du réseau), p est le nombre de paires de pôles et Ω la vitesse angulaire du générateur. R_s et R_r sont des résistances du stator et de rotor, $\phi_{rd/q}$ et $\phi_{sd/q}$ représentent respectivement les flux rotoriques et statoriques.

En Bond Graph les couplages entre les grandeurs statoriques et rotoriques sont faits par un élément I-multiport, et ils sont représentés par l'équation suivante :

$$\begin{pmatrix} \phi_{sd/q} \\ \phi_{rd/q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & L_m \\ L_m & L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{sd/q} \\ i_{rd/q} \end{pmatrix} \quad (5.13)$$

Où L_s est l'inductance cyclique du stator, L_r l'inductance cyclique du rotor et L_m l'inductance magnétisante.

L'expression 5.14 traduit la conversion électromécanique. Cette partie est modélisée dans le Bond Graph en utilisant des éléments gyrateurs.

$$T_{em} = p(\phi_{rq}i_{rd} - \phi_{rd}i_{rq}) \quad (5.14)$$

La partie mécanique est composée de l'inertie du rotor J_g , du frottement mécanique f_g , du couple de charges mécaniques T_m et du couple électromagnétique T_{em} en accord avec :

$$J_g \frac{d\Omega}{dt} = T_{em} - T_m - f_g \Omega \quad (5.15)$$

Le modèle Bond Graph de la machine asynchrone est représenté sur la Figure 5.5.

Il est important de remarquer que les quatre sources modulées (en fonction de ω_s) représentent des sources virtuelles (pas de sources physiques) dans le sens où la somme de leurs puissances est identiquement nulle et ne sont que la conséquence mathématique du modèle, comme est démontré

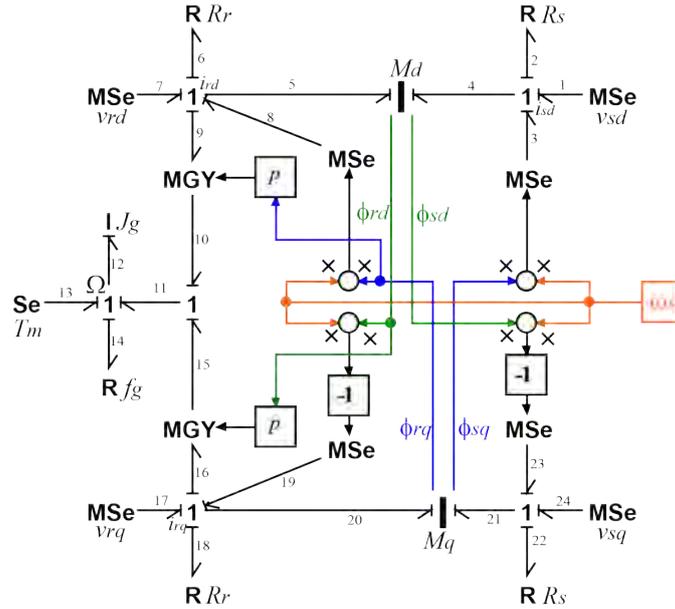


Figure 5.5: Modèle Bond Graph de la MADA dans le repère de Park.

dans [151]. Le modèle est représenté avec cinq variables d'état (deux variables du stator, deux du rotor et la variable de la partie mécanique).

5.4 Modèle de la turbine sans convertisseur de puissance

Le modèle de la turbine a été détaillé dans le chapitre précédent. L'objectif de ce chapitre est de développer un algorithme de commande pour le contrôle de la vitesse et de la puissance active de la machine électrique. Pour cette fin, nous ne considérons que le modèle de la transmission et le modèle de la MADA dans le repère de Park. De plus nous négligeons la dynamique du multiplicateur, et par la suite, nous modélisons le multiplicateur par un simple transformateur de rapport N , le modèle de la turbine étant présenté dans la Figure 5.6.

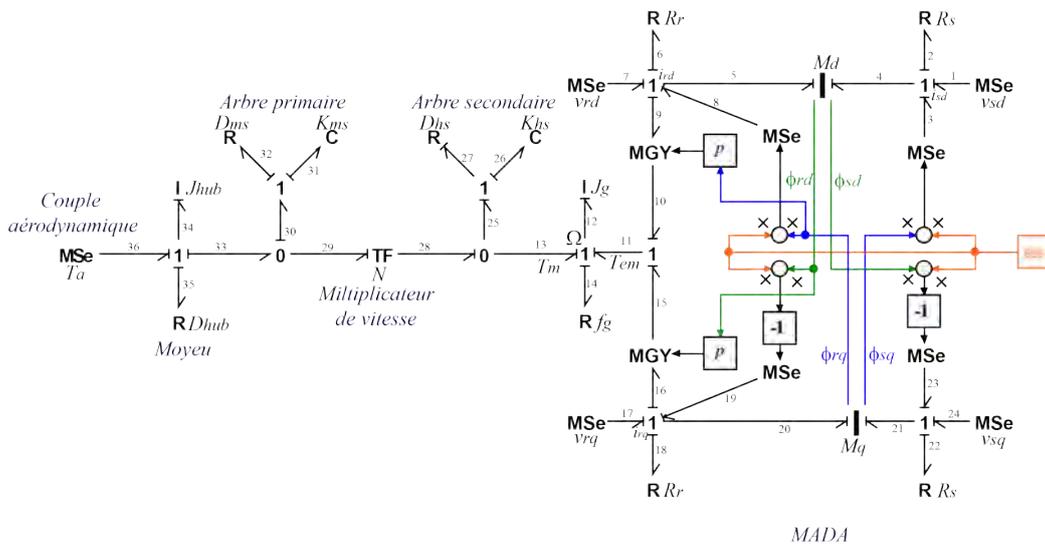


Figure 5.6: Modèle Bond Graph de la turbine sans convertisseur de puissance.

Le modèle de l'éolienne sans convertisseur de puissance est un modèle à plusieurs entrées et à plusieurs sorties. La vitesse du vent V est bien entendu une entrée et est utilisée pour calculer le

couple aérodynamique (T_a) de la turbine éolienne. Le couple mécanique (T_m) de la turbine et le couple électromagnétique (T_{em}) provenant de la MADA sont en opposition et ceux-ci engendrent une vitesse de rotation correspondent à la vitesse angulaire du rotor de la MADA. Les autres entrées de l'éolienne sans convertisseur de puissance correspondent à la tension au stator de la MADA, soit v_{sd} , v_{sq} et ω_s et la tension au rotor v_{rd} et v_{rq} . Pour ce qui est des sorties, elles correspondent aux mesures statoriques de la MADA qui comprennent et les courants au stator i_{sd} et i_{sq} . La prochaine étape consiste à élaborer une commande vectorielle à bas du formalisme Bond Graph de la machine asynchrone dans le but de pouvoir faire varier, à volonté, la vitesse de fonctionnement de l'éolienne. La commande vectorielle possède la capacité, avec l'aide du convertisseur de puissance côté génératrice, d'imposer une tension rotorique (v_{rd} et v_{rq}) afin de faire varier le couple électromagnétique de la MADA.

5.5 Commande de la MADA

Il existe plusieurs stratégies de contrôle de la machine asynchrone, soit :

- La commande scalaire.
- La commande vectorielle à flux orienté.
- Commande directe du couple et du flux.

La commande scalaire [152, 153] découle des expressions en régime sinusoïdal de la machine asynchrone. La stratégie la plus utilisée pour ce type de commande est l'utilisation d'un rapport v_s/f_s constant afin de maintenir un flux magnétique quasi constant à l'intérieur de la machine. Cette méthode est simple et peu coûteuse. Par contre, les performances dynamiques de celle-ci sont mauvaises puisque cette commande repose sur les expressions en régime permanent de la MADA.

Contrairement à la commande scalaire, la commande vectorielle [152, 153] permet le découplage du flux magnétique et du couple électromagnétique à l'intérieur de la machine asynchrone. Le contrôle du flux et du couple est donc indépendant l'un de l'autre. Cette approche est analogue à la commande d'une machine à courant continu. Ceci présente l'avantage d'éviter la saturation du flux dans la machine et d'obtenir une réponse dynamique performante. La commande vectorielle peut être indirecte ou directe et dans chacun des cas, de nombreuses configurations sont possibles. La commande vectorielle directe à flux orienté est semblable à la commande indirecte sauf qu'elle utilise un estimateur (observateur) de flux. Ceci permet de suivre l'évolution du flux dans la machine, d'avoir des performances dynamiques supérieures et d'améliorer la robustesse de la commande face aux variations de paramètres de la machine.

Pour ce qui est de la commande directe du couple et du flux [152, 153], elle nécessite un observateur du couple et du flux, par exemple, un filtre de Kalman ou un observateur de Luenberger. Les erreurs sur le couple et le flux sont traitées par deux relais et une table de commutation. Cette dernière génère la tension optimale à appliquer à la machine asynchrone. Les performances dynamiques de cette commande sont très bonnes et sont comparables aux performances de la commande vectorielle. Par contre, l'utilisation des relais produit des vibrations dans le couple électromagnétique.

Pour la présente étude, la commande vectorielle directe à flux orienté avec capteur de vitesse a été utilisée à base du concept de la bicausalité du Bond Graph. Cette décision a été prise principalement par le fait que cette technique est utilisée régulièrement dans l'industrie pour la commande des MADA.

5.5.1 Description de la commande vectorielle utilisée

L'idée de base de la commande vectorielle à flux orienté est de contrôler indépendamment le flux magnétique et le couple électromagnétique à l'intérieur de la MADA. Et comme la MADA est manipulable via son stator et son rotor, alors, avec l'application d'une tension au rotor, il doit être

possible de contrôler à la fois le couple et le flux. La méthode la plus simple pour réaliser ceci est d'effectuer la commande vectorielle dans le référentiel dq (référence de Park) et de faire coïncider l'axe q avec le flux rotorique. Autrement dit, choisir convenablement l'angle de rotation de Park de sorte que le flux rotorique soit entièrement porté sur l'axe direct (d) et donc d'avoir $\phi_{rq} = 0$. Ainsi $\phi_r = \phi_{rd}$ uniquement (Figure 5.7), et si le flux rotorique ϕ_r est maintenu constant, alors le couple électromagnétique ressemblerait fort à celui d'une MCC (Expression 5.16). Donc, il convient de réguler le flux en agissant sur la composante v_{dr} de tension statorique et on régule le couple en agissant sur la composante v_{qr} . Dans ce but, un algorithme spécifique est conçu, sur la base de Bond Graph bicausal.

$$T_{em} = -p\phi_{rd}i_{rq} \quad (5.16)$$

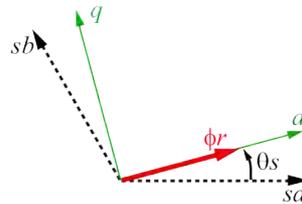


Figure 5.7: Principe du contrôle vectoriel.

5.5.2 Le modèle Bond Graph inverse de la MADA

Pour la formulation du modèle Bond Graph inverse, il est nécessaire de remplacer les éléments sources par des éléments détecteurs et les éléments détecteurs par des éléments sources. Pour arriver au modèle inverse, la bicausalité se propage à partir de l'élément détecteur vers la source. Avec le modèle inverse du Bond Graph on peut construire la structure de la commande en boucle ouverte, puis en en boucle fermée en fixant la dynamique de l'erreur.

Pour notre modèle les variables d'entrée sont les tensions v_{rd} (bonde 7) et v_{rq} (bonde 17) et les variables de sortie sont le flux rotorique ϕ_{rd} (bonde 5) et le couple électromagnétique T_{em} (bonde 11). Le modèle inverse entre le couple électromagnétique T_{em} (bonde 11) et la vitesse de la turbine ω_r (bonde 36) sont détaillés dans le Chapitre 3. L'analyse du modèle Bond Graph direct de la Figure 5.6 indique :

- qu'il existe une ligne de puissance entrée/sortie entre la variable d'entrée v_{rd} (bonde 7) et celui de la variable de sortie ϕ_{rd} (bonde 5) et aussi une ligne de puissance entre la variable d'entrée v_{rq} (bonde 17) et celui de la variable de sortie T_{em} (bonde 11).
- qu'il existe un chemin causal entré/sorti (une relation analytique) entre la variable d'entrée v_{rd} et celui de sortie ϕ_{rd} et entre la variable d'entrée v_{rq} et la de sortie T_{em} .

Le modèle est donc structurellement inversible par rapport au couple de variables v_{rd} et ϕ_{rd} et par rapport au couple de variables v_{rq} et T_{em} (aussi le modèle est inversible par rapport au couple de variables T_{em} et ω_r (Chapitre 3)).

Le modèle Bond Graph inverse du système est illustré sur la Figure 5.8. À la bonde 5 on a placé une source de détecteur (*SeSf*) qui impose à la fois un effort égal à $\frac{d\phi_{rd}}{dt}$ et un flux nul, puis la bicausalité se propage à partir de cette source jusqu'à la source (*MSe = v_{rd}*) du Bond Graph directe qui devient un détecteur de source (*DeDf*) dans le Bond Graph inverse. Il est de même pour le deuxième chemin bicausal entre v_{rq} et T_{em} et entre T_{em} et ω_r .

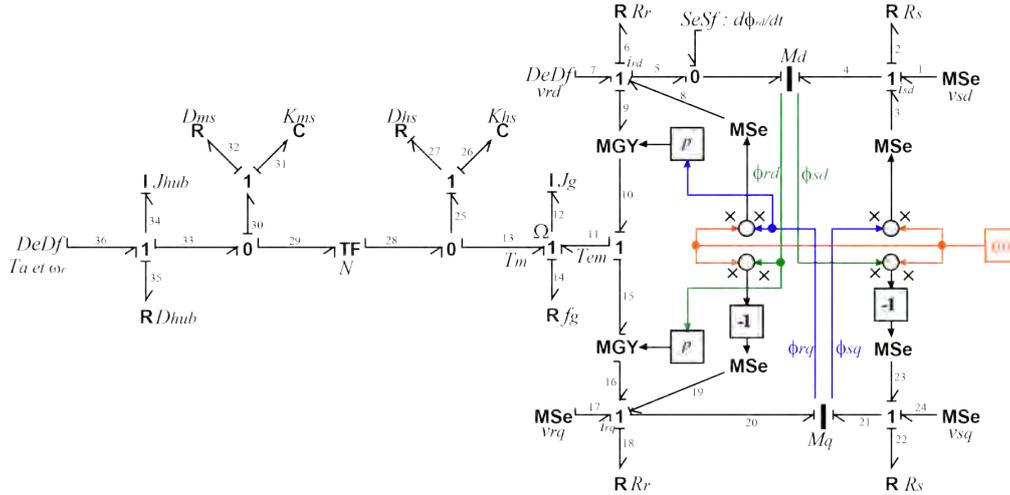


Figure 5.8: Le Bond Graph inverse de la turbine avec MADA.

5.5.3 Formulation de la loi de commande à base du modèle inverse de la MADA

La loi de commande est déterminée en extrayant les équations de commande à partir du modèle Bond Graph inverse de la Figure 5.8. Pour la loi de contrôle du flux de rotor on peut écrire les relations constitutives suivantes : à partir de la jonction-1 placée entre les bondes 5, 6, 7, 8, et 9 on a :

$$\begin{cases} f_5 = f_7 = i_{rd} \\ e_5 = -e_6 + e_7 + e_8 - e_9 \end{cases} \quad (5.17)$$

Avec $e_5 = \frac{d\phi_{rd}}{dt}$, $e_6 = R_r i_{rd}$, $e_7 = v_{rd}$, $e_8 = \omega_s \phi_{rq}$ et $e_9 = p \phi_{rq} \Omega$, on a $\phi_{rq} = 0$ donc :

$$\begin{cases} f_5 = i_{rd} \\ v_{rd} = \frac{d\phi_{rd}}{dt} + R_r i_{rd} \end{cases} \quad (5.18)$$

Pour établir la loi de contrôle en boucle fermée, la dynamique de l'erreur est définie par l'Équation 5.19 :

$$\dot{\epsilon} + k_1 \epsilon = 0 \quad (5.19)$$

Où k_1 représente le contrôleur à utiliser et $\epsilon = \phi_{rd-ref} - \phi_{rd}$, est l'erreur. L'Expression 5.18 devient 5.20 comme suit :

$$\begin{cases} f_5 = i_{rd} \\ v_{rd} = \frac{d}{dt}(\phi_{rd-ref} - \epsilon) + R_r i_{rd} \end{cases} \quad (5.20)$$

Finalement

$$\begin{cases} f_5 = i_{rd} \\ v_{rd} = \frac{d}{dt}(\phi_{rd-ref}) + k_1(\phi_{rd-ref} - \phi_{rd}) + R_r i_{rd} \end{cases} \quad (5.21)$$

De la même manière, la loi de commande du couple peut être calculée. L'Équation 5.22 est dérivée à partir du Bond Graph inverse à partir de la jonction placée entre les bondes 16, 17, 18, 19 et 20.

$$\begin{cases} f_{16} = i_{rq} \\ e_{17} = -e_{16} + e_{18} - e_{19} + e_{20} \end{cases} \quad (5.22)$$

Avec $e_{17} = v_{rq}$, $e_{18} = R_r i_{rq}$, $e_{19} = -\omega_s \phi_{rd}$ et $e_{20} = L_m \frac{d}{dt} i_{sq} + L_r \frac{d}{dt} i_{rq}$ donc :

$$\begin{cases} f_{16} = i_{rq} \\ v_{rq} = -e_{16} + R_r i_{rq} + \omega_s \phi_{rd} + L_m \frac{d}{dt} i_{sq} + L_r \frac{d}{dt} i_{rq} \end{cases} \quad (5.23)$$

Pour établir la loi de contrôle en boucle fermée, la dynamique de l'erreur pour le courant i_{rq} est définie par $\dot{\epsilon} + k_1\epsilon = 0$. Où k_2 représente le contrôleur à utiliser et $\epsilon = i_{rq-ref} - i_{rq}$, par la suite, l'Expression 5.23 devient 5.27.

$$\begin{cases} f_{16} = i_{rq} \\ v_{rq} = -e_{16} + R_r i_{rq} + \omega_s \phi_{rd} + L_m \frac{d}{dt} i_{sq} + L_r \frac{d}{dt} i_{rq-ref} + L_r k_2 (i_{rq-ref} - i_{rq}) \end{cases} \quad (5.24)$$

À partir de l'élément MGY, nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} e_{15} = p\phi_{rd}f_{16} \\ e_{16} = p\phi_{rd}f_{15} \end{cases} \quad (5.25)$$

À partir de la jonction-1 placée entre les bondes 10, 11 et 15 nous pouvons écrire :

$$\begin{cases} f_{11} = f_{15} = \Omega \\ e_{11} = T_{em} = e_{10} - e_{15} = p(\phi_{rq}i_{rd} - \phi_{rd}i_{rq}) = -p\phi_{rd}i_{rq} \end{cases} \quad (5.26)$$

On peut écrire $T_{em-ref} = -p\phi_{rd}i_{rq-ref}$, donc l'Expression 5.27 devine :

$$\begin{cases} f_{16} = i_{rq} \\ v_{rq} = -p\phi_{rd}\Omega + R_r i_{rq} + \omega_s \phi_{rd} + L_m \frac{d}{dt} i_{sq} + L_r \frac{d}{dt} \left(-\frac{T_{em-ref}}{p\phi_{rd}}\right) + L_r k_2 \left(-\frac{T_{em-ref}}{p\phi_{rd}} - i_{rq}\right) \end{cases} \quad (5.27)$$

Les équations extraites du Bond Graph inverse de la jonction-1 placée entre les bondes 11, 12, 13 et 14 jusqu'à la jonction-1 placée entre les bondes 33, 34, 35 et 36 sont détaillées dans le Chapitre 3.

À partir de ces équations et celles établies dans le chapitre 3 on peut construire le schéma de contrôle vectoriel de la machine asynchrone (Figure 5.9) avec une régulation de vitesse, une régulation de flux ϕ_{rd} et une régulation de courant i_{ds} . Ces deux dernières sont régulées par deux boucles dont les sorties sont les tensions de références v_{rq} et v_{rd} dans le repère de Park.

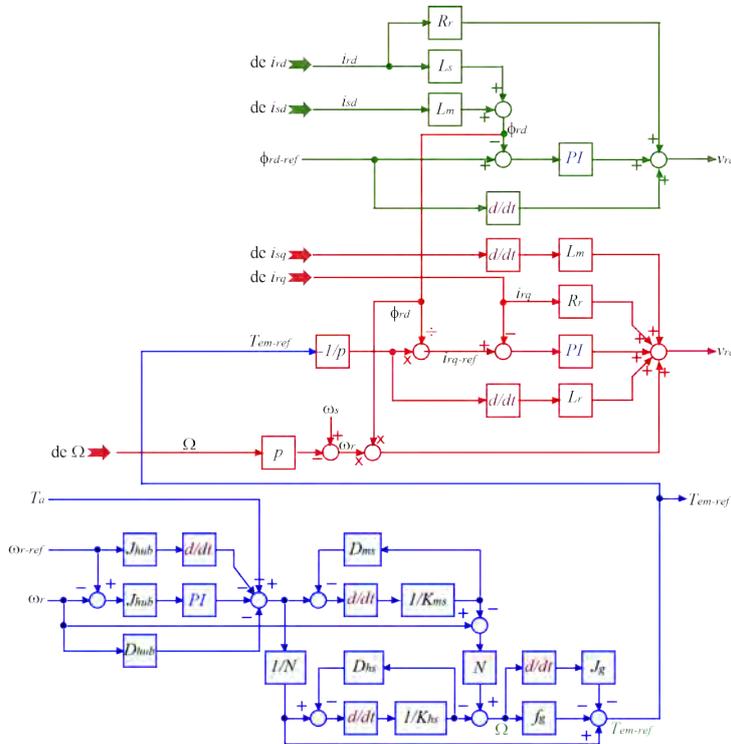


Figure 5.9: Schéma de contrôle du couple de la MADA.

On a donc 3 régulateurs dans ce schéma :

Le régulateur de vitesse : Il prend en entrée la vitesse de référence et la vitesse mesurée. Il agit sur le couple (c'est-à-dire que sa sortie est le couple de référence T_{em-ref}) pour réguler la vitesse.

Le régulateur du couple T_{em} : Il prend en entrée le couple de référence. Il agit sur la tension v_{rq} pour ajuster le couple électromagnétique à sa valeur de référence T_{em-ref} . Si l'on regarde de plus près le schéma, on remarque qu'il y a un coefficient entre le couple de référence T_{em-ref} et le courant de référence i_{rq-ref} . Ce coefficient tient compte de la valeur du flux ϕ_{rd-ref} . Ce flux doit être constant pour un bon contrôle du couple, ce qui constitue le rôle du troisième régulateur.

Le régulateur de flux ϕ_{rd} : Il prend en entrée le flux de référence ϕ_{rd-ref} et sa mesure à travers les courants i_{rd} et i_{sd} . Il agit sur la tension v_{rd} pour garantir un flux rotorique constant.

Les paramètres de référence sont générés en utilisant la méthode de MPPT présentée dans le chapitre 3.

5.6 Résultats de Simulation

Afin de vérifier la robustesse et la validité de la loi de commande proposée, une simulation du comportement du système à été effectuée en considérant le modèle complet de la turbine éolienne présenté dans le Chapitre 4. Le modèle global de la turbine avec contrôleur et représenté sur la Figure 5.10 (pour simplifier la visualisation du modèle, on a représenté le sous-système aérodynamique et le sous-système de calage seulement pour une seule pale). Le système contient essentiellement deux boucles de régulation : la boucle de régulation de la vitesse angulaire de l'éolienne en agissant sur le couple électromagnétique de la MADA. Cette commande fournit les v_{rd} et v_{rq} pour contrôler le couple électromagnétique de la machine dans le but de réguler la vitesse de la turbine à une référence. Et la boucle de régulation de la puissance en agissant sur l'angle de calage de la pale (cette dernière boucle est détaillée dans le Chapitre 3). Ces deux boucles d'asservissement fonctionnent simultanément, mais une seule d'entre elles est dominante en fonction de la zone de fonctionnement (Chapitre 3). Lorsque la vitesse du vent est inférieure à la vitesse nominale de la turbine, la boucle de commande de vitesse est utilisée pour réguler la vitesse de la turbine pour capturer le maximum d'énergie. Lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse nominale, la boucle de commande de puissance est utilisée pour fournir l'angle de calage suffisant pour réguler la puissance extraite à sa valeur nominale (Chapitre 3).

Des éléments supplémentaires, tels que les capteurs, la transformation de Park, sont nécessaires pour simuler le système. Pour la turbine, on utilise des capteurs de couple et de vitesse angulaire, tandis que pour le générateur, les capteurs de courant de rotor et de stator sont nécessaires pour estimer les flux magnétiques.

Notons qu'ici la présence du convertisseur côté machine n'est pas prise en compte. Cela permet de connecter les tensions v_{rd} et v_{rq} directement via les éléments sources modulés MSe. La Figure 5.10 illustre en détail la connexion entre le système de commande et la turbine éolienne. Afin de permettre un échange de puissance, une charge triphasée est connectée aux bornes de la machine. La transformation du Park est utilisée pour transformer la référence dq à la référence abc .

Afin de mettre en évidence le comportement du modèle Bond Graph complet de la turbine, deux simulations différentes sont effectuées. Tout d'abord, on considère un profil éolien constant, puis on utilise des profils de vent variable. Ces simulations ont été effectuées à l'aide du logiciel 20-Sim.

Le scénario de simulation pour le vent constant est représenté sur la Figure 5.11(a), les Figures de 5.11a à 5.11e montrant respectivement les réponses de simulation pour la vitesse du vent, la vitesse de rotation de la MADA, la vitesse spécifique λ , le coefficient de puissance et l'angle de calage.

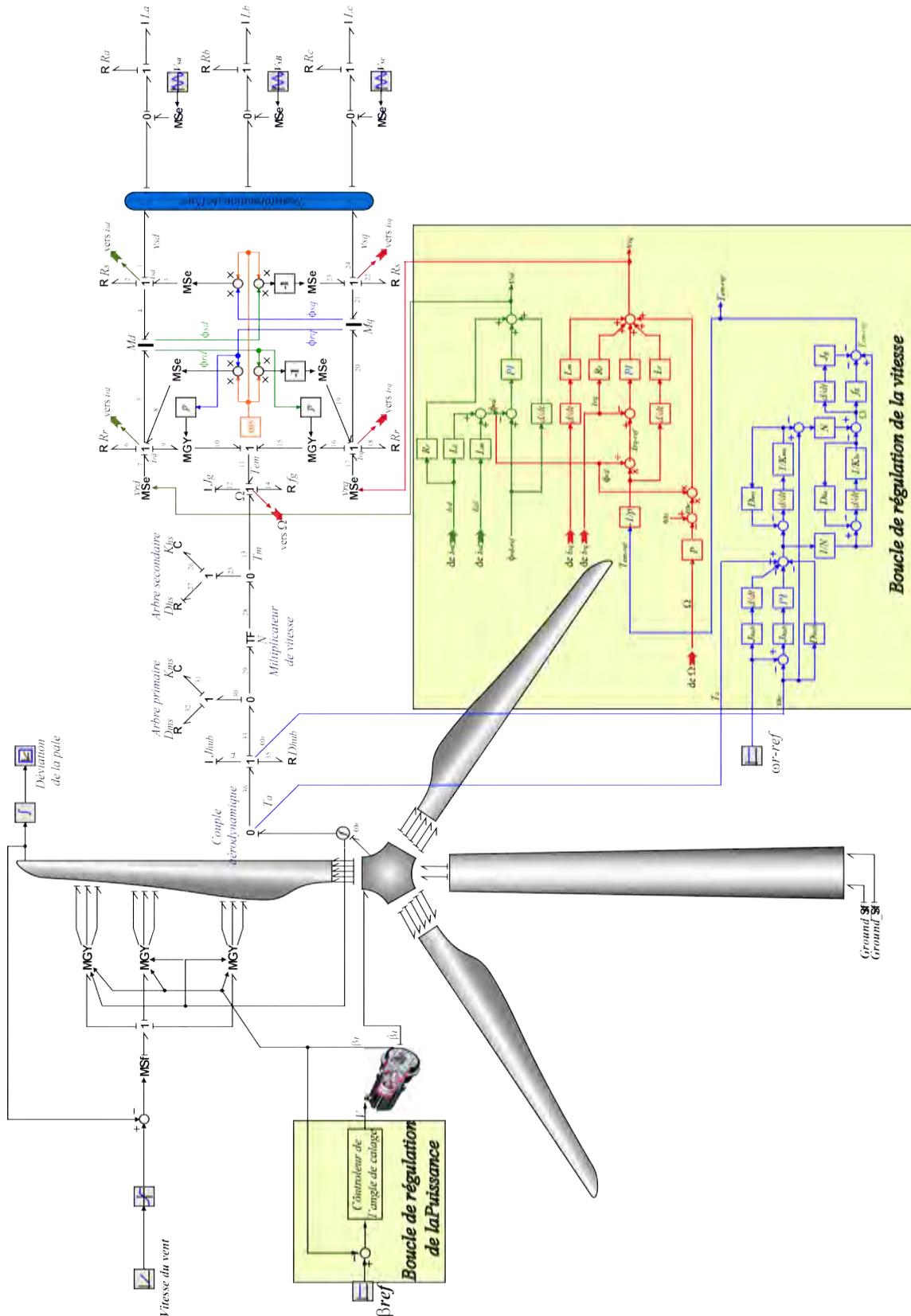


Figure 5.10: Schéma de contrôle de la MADA.

La vitesse dans de la MADA augmente dans le même rapport que la vitesse du vent tandis que cette dernière ne dépasse pas sa valeur nominale (12m/s). Si la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale, la vitesse de la turbine est maintenue fixe à sa valeur nominale (246rad/s) (Figure 5.11b). Ceci est dû au fait que cette valeur a été supposé le point de consigne maximum de la vitesse de la

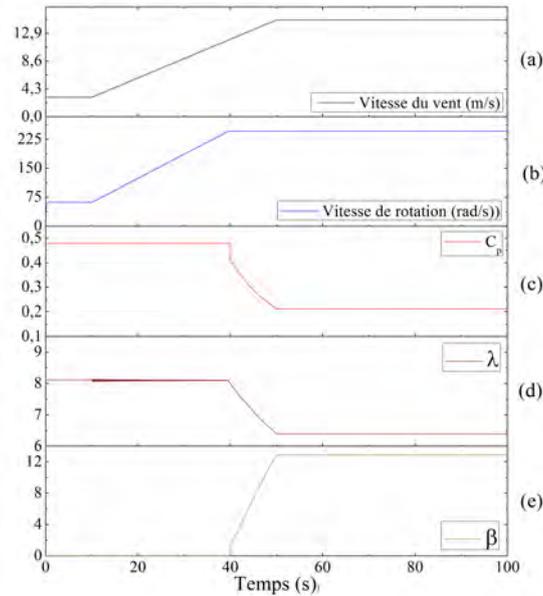


Figure 5.11: Réponse pour un profil du vent constant.

turbine. La Figure 5.11d représente la courbe correspondante au rapport de vitesse λ , qui est constant dans le cas où la vitesse du vent et celle de la turbine varient d'un même rapport. Lorsque la vitesse du vent augmente en dessus de sa valeur maximale, la vitesse de la turbine est constante et par la suite le rapport de vitesse diminue de 8 à $7m/s$, puis il reste constant puisque les deux vitesses sont maintenues constantes. Un cas similaire est montré pour le coefficient de puissance C_p (Figure 5.11c). La Figure. 5.11e met en évidence également l'angle de calage appliqué aux pales, qui commence à varier à l'instant où la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale ($12m/s$).

Le couple de référence fourni par la loi de commande est comparé au couple réel dans le générateur (Figure 5.12). Ces deux courbes concordent étroitement; seule une petite différence a été identifiée au cours de la phase transitoire. Il est important de noter que le bruit présenté dans la simulation est sans impact significatif sur le comportement de la loi de contrôle. Cet effet de bruit est présent dans toutes les réponses.

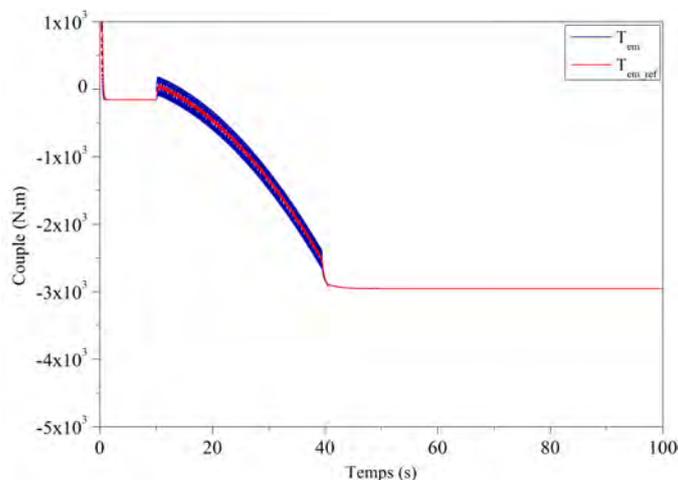


Figure 5.12: Couple pour un profil du vent constant.

La puissance transférée au réseau est le paramètre le plus important à prendre en compte dans

une turbine éolienne. La Figure 5.13 représente la puissance active fournie au réseau électrique. On remarque que la puissance ne dépasse pas sa valeur nominale durant le processus de simulation. Il est important de mentionner qu'une condition initiale de la vitesse de rotation de la MADA est utilisée pour permettre la simulation.

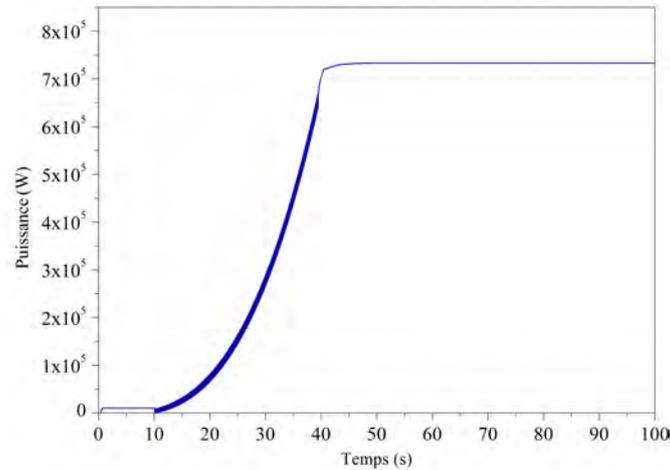


Figure 5.13: Puissance pour un profil du vent constant.

Les résultats de simulation pour le profil du vent constant permettent de valider les concepts théoriques liés au fonctionnement dynamique de la turbine éolienne. En réalité le vent est un paramètre stochastique de nature fluctuante, la deuxième simulation a été effectuée pour un profil de vent variable comme la montre la Figure 5.14(a).

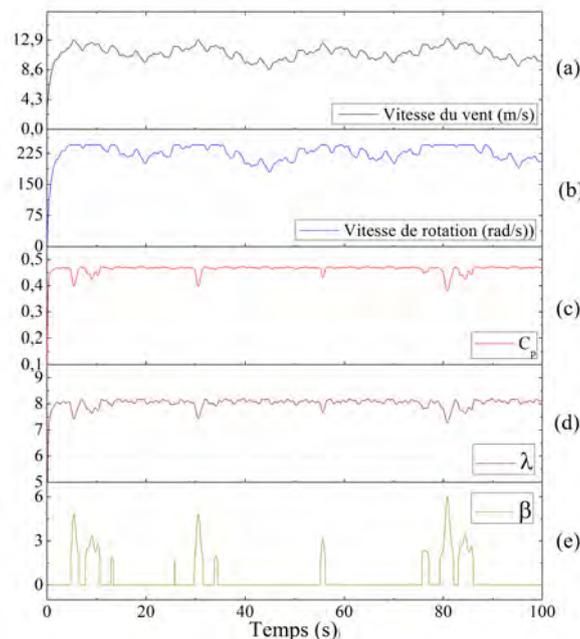


Figure 5.14: Réponse pour un profil du vent variable.

Les Figures de 5.14(b) à 5.14(e) schématisent la réponse de simulation pour les variables d'éolienne sélectionnées. La vitesse de rotation de la MADA varie du même rapport que la vitesse du vent lorsque cette dernière ne dépasse pas sa valeur nominale, lorsque la vitesse du vent traverse la valeur nominale (12 m / s) pendant de petites périodes, la vitesse de la MADA atteint sa valeur nominale (226 rad / s). Le même comportement est présenté dans la courbe de C_p (Figure 5.14(c)) et la courbe de λ (Figure

5.14(d)). La boucle de régulation de la puissance rentre en action lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale. Ceci est mis en évidence sur la Figure 5.14(e) qui représente la variation de l'angle de calage au cours du processus de simulation.

La Figure 5.15 montre la comparaison entre le couple de référence et le couple de la MADA. De façon similaire à la simulation à vitesse du vent constante, les courbes de la Figure 5.15 sont en accord étroit. Seule une très petite différence peut être appréciée.

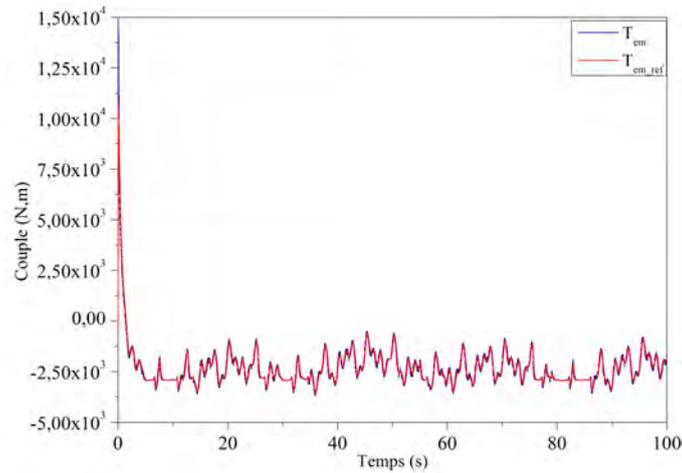


Figure 5.15: Couple pour un profil du vent variable.

Enfin, la puissance active est présentée à la Figure 5.16. Cette puissance est limitée à sa valeur maximale qui peut être extraite par l'éolienne (750 kW).

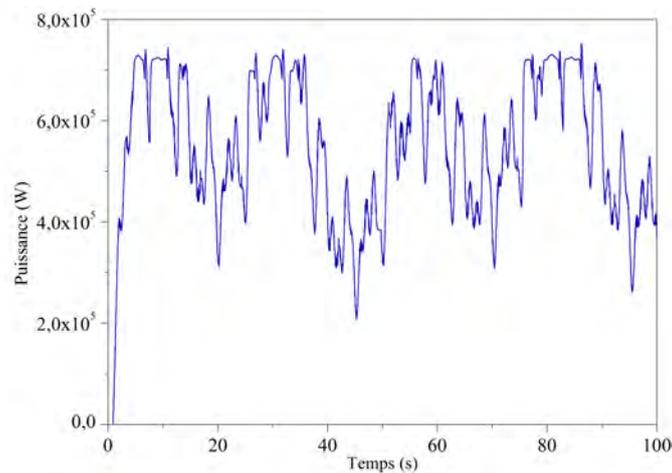


Figure 5.16: Réponse pour un profil du vent variable.

Les résultats de la simulation peuvent vérifier que la loi de commande proposée pour le contrôle de la MADA présente une bonne performance, soit pour un profil de vent constant ou variable.

5.7 Conclusion

Ce chapitre a été dédié à la modélisation et à la commande de la chaîne de conversion de l'éolienne constituée d'une machine asynchrone à doubles alimentations. La méthode Bond Graph est utilisée pour modéliser la MADA. Nous avons opté pour le modèle de Park exprimé dans un référentiel lié au flux rotorique. À partir de ce modèle, nous avons construit un dispositif de commande de l'ensemble afin de faire fonctionner l'éolienne de manière à extraire le maximum de puissance de l'énergie du vent et de protéger l'ensemble du système. L'architecture de cette commande est formulée en inversant le modèle Bond Graph. Les lois de commande ont été intuitivement obtenues en considérant ce modèle inverse.

La dernière partie de ce chapitre est consacré à une simulation de l'ensemble du système éolien, les résultats obtenus montrent clairement l'efficacité de ce mode de contrôle.



Conclusion générale et perspectives

Dans ce mémoire, une approche mécatronique pour la modélisation des systèmes multi-domaines a été proposée. Elle a été appliquée à un support industriel : la turbine éolienne à axe horizontal. Pour conclure ce mémoire, nous rappelons les principaux objectifs de ces travaux et proposons une synthèse des différentes contributions qui ont été apportées. Ensuite, les perspectives de ces travaux et leur insertion dans le cadre industriel seront évoquées.

Rappel des objectifs

L'objectif principal de cette thèse était de proposer une méthode de modélisation mécatronique et de commande d'une turbine éolienne à partir de l'outil Bond Graph. Cet objectif a été décliné en trois sous-objectifs.

- Le premier visait à analyser les caractéristiques et les approches existantes pour la modélisation de systèmes mécatroniques complexes comprenant des caractéristiques multi-interactions, multi-physiques, multi-phases, avec des comportements difficiles à appréhender.
- Le deuxième était de proposer une méthode de modélisation de simulation et de contrôle de systèmes mécatroniques permettant une vision à la fois globale et modulaire à partir de l'outil Bond Graph et ensuite d'illustrer cette méthode sur un cas d'application suffisamment représentatif (turbine éolienne).
- Le troisième était centré sur l'élaboration d'un modèle unifié de la turbine éolienne qui permet notamment d'étudier et de maîtriser le comportement dynamique de ce système complexe et par la suite de développer des systèmes de commande qui garantissent le bon fonctionnement de ce système.

Synthèse des travaux réalisés

Le premier chapitre de ce mémoire a permis de préciser le contexte scientifique et les objectifs de ce travail en montrant les verrous technologiques autour de deux thèmes. Le premier concerne le développement des systèmes mécatronique : la caractérisation d'un système mécatronique complexe a été présentée, la démarche de conception ainsi que la phase de simulation de tels systèmes ont été détaillées afin de fournir un cadre précis d'étude pour la modélisation de la turbine éolienne. Les principaux types de modèles de simulation ont été définis et une classification a été proposée. Le second

thème concerne les technologies de production d'énergie éolienne : les concepts fondamentaux de la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique sont présentés, un état de l'art sur les différentes technologies de ce système a été dressé. Les actions de recherche actuelles sur ces thèmes se focalisent essentiellement autour de la modélisation et la définition d'algorithmes de commande.

Un aperçu des principaux outils de modélisation utilisés dans cette phase de pré-dimensionnement a été, ensuite, présenté dans le chapitre 2. Il a été, ainsi, montré que les propriétés des outils de modélisation structurels en font de très bons candidats pour la modélisation des systèmes mécatroniques complexes comme la turbine éolienne. Parmi ces outils de modélisation structurels, l'outil Bond Graph a été sélectionné, car il permet, d'une part, une modélisation modulaire de systèmes de différents domaines de la physique à l'aide d'un même modèle et d'autre part, de mener d'autres analyses complémentaires comme, par exemple, celle des propriétés structurelles du modèle, l'analyse énergétique du système, l'identification des paramètres des systèmes et l'élaboration des algorithmes de commande.

À partir de l'étude approfondie de cet outil de représentation, nous avons proposé, au troisième chapitre, une approche visant une exploitation fondamentale du Bond Graph pour la modélisation et la commande des systèmes multiphysiques. Cette démarche a été illustrée sur la base d'une chaîne de conversion éolienne et peut se résumer en quelques étapes. À partir d'un système physique existant ou en cours de conception, avec une expertise potentiellement faible, il est possible d'arriver à établir le modèle physique multi-domaine de ce système dans la première étape. Une deuxième étape consiste à utiliser ce modèle pour la déduction d'une structure de commande par inversion du système. Une comparaison entre l'outil Bond Graph et les méthodes classiques montre que le Bond Graph offre plus d'avantages au niveau de la flexibilité et de la simplicité de modélisation.

Dans le quatrième chapitre, une analyse énergétique de la turbine éolienne, ayant pour principale préoccupation la représentation de la transmission de puissance dans le système, a été introduite. Nous avons pu proposer, à partir de cette analyse, une description macroscopique et énergétique de la turbine éolienne basée sur le Bond Graph à mots. Ensuite, nous avons analysé les différentes parties de cette description en montrant l'intérêt de décrire et modéliser ces parties en détail. Le modèle obtenu décrit en profondeur le comportement réel de la turbine. Il décrit les phénomènes dynamiques les plus importants que l'on peut rencontrer dans le système. Après simulation, de bons résultats ont été obtenus avec le modèle proposé.

Le dernier chapitre a été réservé à la modélisation par l'outil Bond Graph d'un système de conversion de l'énergie éolienne basé sur une machine asynchrone à double alimentation. Le modèle utilisé est celui de Park, exprimé dans un référentiel tournant à la vitesse de synchronisme et dont l'axe direct est aligné avec le flux rotorique. Une fois cette modélisation a été réalisée, les algorithmes de commande sont déterminés en utilisant le modèle inverse du Bond Graph. Les stratégies de commande développées sont testées dans un environnement de modélisation 20-Sim, sans tenir compte de la présence des convertisseurs de puissance. L'introduction de ces derniers permet d'obtenir des représentations plus proches de la réalité. La modélisation du convertisseur de puissance est réservée pour un travail ultérieur. Moyennant les résultats de simulation, on peut conclure que cette stratégie de commande permet de donner de bons résultats pour la commande de la vitesse et de la puissance d'une turbine éolienne.

Perspectives

L'ensemble de ces travaux peut être poursuivi et complété par des perspectives pouvant contribuer à l'amélioration de l'ensemble chaîne de conversion éolienne. Parmi les perspectives envisageables :

- Établissement d'un modèle de convertisseurs on utilisant la méthode de Bond Graph.
- Élaboration d'une stratégie de commande de puissance active et réactive de la MADA à base du

modèle Bond Graph de convertisseurs de puissance.

- Concernant la MADA, la commande en puissance étudiée a été réalisée par des régulateurs à base du modèle inverse du Bond Graph. Il est intéressant de tester d'autres types de régulateurs réputés comme étant robustes.
- Adaptation du modèle développé et stratégies de contrôle sur des aérogénérateurs de puissances plus importantes.
- Réalisation expérimentale de toutes les commandes de la MADA pour vérifier et exploiter les essais des simulations présentés.



Références bibliographiques

- [1] Rapport annuel du Global Wind Energy Council (GWEC), 2009.
- [2] Institut pour l'Innovation et la Compétitivité i7, mai 2013.
- [3] Mendonça, Miguel, Stephen Lacey, et Frede Hvelplund. 2009. « Stability, participation and transparency in renewable energy policy: Lessons from Denmark and the United States ». *Policy and Society*27(4):379-398.
- [4] Meyer, Niels I « Learning from wind energy policy in the EU: lessons from Denmark, Sweden and Spain ». *European Environment* 17(5):347-362, 2007.
- [5] Rapport, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21), 'Les Energies Renouvelables, Rapport sur la Situation Globale', 2009.
- [6] S. Jacobsson and V. Lauber, 'The Politics and Policy of Energy System Transformation—Explaining, the German Diffusion of Renewable Energy Technology', *Energy Policy*, Vol. 34, Num 3, pp. 256 - 276, 2006.
- [7] ISERMANN R., *Mechatronic systems—Innovative products with embedded control*, Control Engineering Practice, vol. 16, pp. 14-29, 2008.
- [8] Daniel, R.W., Hewit, J.R. Editorial. *Mechatronics*, 1(1) :i-ii, 1991.
- [9] Comerford, R. Mecha...what ? *IEEE Spectrum*, 31(8) :46-49, août 1994.
- [10] Kyura, N., Oho, H. *Mechatronics - an industrial perspective*. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1(1) :10-15, mars 1996.
- [11] IFAC Technical Committees. <http://tc.ifac-control.org/4/2/scope>
- [12] C.T. Leondes. *Mechatronic Systems Techniques and Application: Diagnostic, Reliability and Control System Techniques*, volume 5. Gordon and Breach Science, 2000.
- [13] C.T. Leondes. *Mechatronic Systems Techniques and Application. Transportation and Vehicular Systems*, volume 2. Gordon and Breach Science, 2000.
- [14] Centre technique des industries mécaniques CETIM. *Etat de l'art et perspectives de la mécatronique dans l'industrie automobile en Europe et en France*. Cetim, 2006.
- [15] AFNOR. *Mécatronique - vocabulaire. Norme NF E01-010*, novem bre 2008.
- [16] CHOLEY J.-Y., *Mécatronique : une nouvelle démarche de conception des systèmes complexes*, Technologies et Formations, 2006.
- [17] JARDIN A., *Contribution a une méthodologie de dimensionnement des systèmes mécatroniques : analyse structurale et couplage a l'optimisation dynamique*, Thèse de doctorat, Electronique, Electrotechnique, Automatique EEA, INSA de Lyon, Lyon, 2010.

- [18] LE MOIGNE J. L., La modélisation des systèmes complexes. Paris: Edition DUNOD, 1999.
- [19] CHIKHAOUI Z., Contribution a une modélisation énergétique des systèmes de type hélicoptère, Thèse de doctorat, Automatique, Arts-et-Métiers PARISTECH, Aix-en-Provence, 2013.
- [20] NOYES D., PERES F., Analyse des systèmes Sûreté de fonctionnement, Techniques de l'ingénieur, 2007.
- [21] DELAVAN P., Simulation numérique dans le processus de conception de systèmes mécaniques, Techniques de l'ingénieur, 2009.
- [22] AFNOR, Mécatronique cycle de vie et conception des produits, ed: Norme XP E 01-013, 2009.
- [23] AOUSSAT A., LE COQ M., Méthodes globales de conception de produits, in Conception de produits mécaniques, M. TOLLENAERE, Ed., Paris: Editions HERMES, 1998.
- [24] LEBRUN M., Simulation et CAO en automatique et mécatronique, Techniques de l'ingénieur, 2003.
- [25] PLATEAUX R., PENAS O., CHOLEY J. Y., MHENNI F., RIVIERE A., Méthodologie de conception d'un produit mécatronique, presented at the 19ème Congrès Français de Mécanique, Marseille, 2009.
- [26] DAUPHIN-TANGUY G., Les bonds graphs et leur application en mécatronique, Techniques de l'ingénieur, 1999.
- [27] LETROUVE T., Structuration de la commande de la simulation au prototype d'un véhicule hybride double parallèle au travers de la représentation énergétique macroscopique, Thèse de doctorat, Génie Electrique, Université Lille 1, Lille, 2013.
- [28] VIRELY J.-M., Analyse du besoin, ENS CACHAN, 2014.
- [29] VIRELY J.-M., Analyse fonctionnelle du besoin, ENS CACHAN, 2014.
- [30] VIRELY J.-M., Analyse fonctionnelle technique, ENS CACHAN, 2014.
- [31] CHARPENTIER F., MATHIEU L., L'analyse fonctionnelle technique, une solution pour la recherche des conditions fonctionnelles géométriques, présente at the Journée thématique AIP-PRIMECA sur le Tolérancement du 23 septembre à l'ENS de Cachan., 2000.
- [32] ZWINGMANN X., Modelé d'évaluation de la fiabilité et de la maintenabilité au stade de la conception, Thèse de doctorat, Génie mécanique, Université Louis- Pasteur Strasbourg, 2005.
- [33] VIRELY J.-M., Simulation des systèmes industriels, ENS CACHAN, 2010.
- [34] CHAN C. C., BOUSCAYROL A., CHEN K., Electric, Hybrid, and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling, IEEE Transactions on vehicular technology, 2010.
- [35] DEVALAN P., Introduction a la mécatronique, Techniques de l'ingénieur, 2010.
- [36] BUDINGER M., LISCOUET J., HOSPITAL F., MULTON B., Chaines de transmission de puissances mécatroniques - Mise en place des modelés d'estimation pour la conception préliminaire, Techniques de l'ingénieur, 2011.
- [37] PEARSON J. T., GOODALL R. M., MEI T. X., HIMMELSTEIN G., Active stability control strategies for a high speed bogie, Control Engineering Practice, 2004.
- [38] MARQUIS-FAVRE W., JARDIN A., Bond graph pour la conception des systèmes mécatroniques, Techniques de l'ingénieur, 2012.
- [39] DAUPHIN-TANGUY G., MARE J.-C., DENIS R., DEBIANE A., Approche virtuelle pour la conception et le développement de systèmes mécatroniques - Méthodologie, Techniques de l'ingénieur, 2014.
- [40] BORUTSKY W., Bond Graph Methodology - Development and Analysis of Multidisciplinary Dynamic System Models, Springer ed., 2010.
- [41] IGNACIO SILVA L., BOUSCAYROL A., DE ANGELO C. H., LEMAIRESEMAIL B., Coupling Bond Graph and Energetic Macroscopic Representation for Electric Vehicle Simulation, Mechatronics, 2013.
- [42] FICHOU P., La modélisation multiphasique, Technologie magazine, 2013.
- [43] AURIER T., COLOMBARI G., Modelé de comportement, Technologie magazine, 2012.
- [44] www.energies-renouvelables.org

- [45] Nicolas LAVERDURE « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » thèse de doctorat de L'INPG Spécialité Génie Electrique Institut national polytechnique de décembre 2005
- [46] Energie éolienne, Théorie, conception et calcul pratique des installations, Désiré Le Gourières, Edition EYROLLES, 1980.
- [47] N. Laverdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme, "Technologie des systèmes éoliens – intégration dans les réseaux électriques", la Revue 3EL, no. 39, 2004.
- [48] J. Lesenne, F. Notelet, G. Séguier, Introduction à l'électrotechnique approfondie, Technique et documentation, Paris, 1981, ISBN 2-85206-089-2.
- [49] E. Muljadi, K. Pierce, P. Migliore, Control Strategy for Variable-Speed, Stall-Regulated Wind Turbine, in Proc, 17th American Control Conf, Vol. 3, 1998, pp. 1710-1714.
- [50] R. Hpfman, P. Mutschler, Comparison of wind turbine regarding their energy generation, PESC'02, Cairns, Australia, 23-27 June, 2002, CD.
- [51] M. Deicke, R. W. De Donker, Doubly-Fed Induction Generators Systems for Wind Turbines, IEEE Industry Application Magazine, May – June 2000, 1077-2618/02, pp. 26 – 33.
- [52] POURROY F., REMONDINI L., YANNOU B., VASILIU A., CLOZEL P., Méthodes globales de conception de produits, in Conception de produits mécaniques, M. TOLLENAERE, Ed., Paris: HERMES, 1998.
- [53] GOMEZ C., SALVY B., Calcul formel, Techniques de l'ingénieur, 2008.
- [54] PAPEGAY Y., Outils formes pour la modélisation en mécanique, Mécanique, INRIA, 1992.
- [55] LHOMME Walter., gestion d'énergie de véhicules électriques hybrides basée sur la représentation énergétique macroscopique, Génie Électrique, Université des Sciences et Technologies de Lille.
- [56] PAYNTER (H. M.). Analysis and design of engineering systems. Cambridge (United Kingdom): The MIT Press, 1960. ISBN : 0262160048.
- [57] KARNOPP (D. C.), MARGOLIS (D. L.), ROSENBERG (R. C.). System dynamics: modeling and simulation of mechatronic systems. 3rd ed. New York (U.S.A.): Wiley InterScience, 1999. 520 p., ISBN: 0471333018.
- [58] ROSENBERG (R. C.), KARNOPP (D. C.). Introduction to physical system dynamics. New York (U.S.A.): Mc Graw-Hill, 1983. 429 p., ISBN: 0070539057.
- [59] THOMA (J. U.). – Introduction to bond graphs and their applications. – 1st ed. – Oxford (United Kingdom): Pergamon Press, 1975. – 181 p., ISBN: 0080188818.
- [60] VITTECOQ E., EL KAMEL A., Comparaison de moteurs : simulation dynamique v. Bond Graphs, in Conception de produits mécaniques, M. TOLLENAERE, Ed.: Hermès, 1998.
- [61] DAUPHIN-TANGUY G., Les bonds graphs. Paris: Hermès Sciences, 2000.
- [62] DERKAOUI A., VERGÉ M., MECHBAL N., Non-Linear control using inverse Bond Graph, 3ième Congrès International Conception et Modélisation des Systèmes Mécaniques CMSM'2009, Hammamet, Tunisie, 2009.
- [63] RIDEOUT G., System partitioning and physical domain proper modeling through assessment of power-conserving model structure, Thèse de doctorat, University of Michigan, 2004.
- [64] NIESNER C., Sensibilité et robustesse à l'incertitude paramétrique, une approche Bond graph, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, Lille, 2005.
- [65] ZANASI (R.). – "Power-oriented graphs for modeling electrical machines". – Electro-technical Conference (MELECON'96). – May 1996, vol. 3, p. 1211-1214.
- [66] MORSELLI (R.), ZANASI (R.), CIRSONE (R.), SERENI (E.), BEGDONI (E.), SE-DONIE (E.). – "Dynamic modeling and control of electro-hydraulic wet clutches". – Proc. of the IEEE Intelligent Transportation Systems. – October 2003, vol. 1, p. 660-665.
- [67] ZANASI (R.), VISCONTI (A.), SANDONI (G.), MORSELLI (R.). – "Dynamic modeling and control of a car transmission system". – Proc. of IEEE American Society of Mechanical Engineers (ASME) on Advanced Intelligent Mechatronics. – Como (Italy), July 2001, vol. 1, p. 416-421.
- [68] ZANASI (R.), SANDONI (G.). – "Modeling and electronic control of a lighting system". – Proc. of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE). –Aquila (Italy), July 2002, p. 1229-1234.

- [69] SCHÖNFELD (R.), GEITNER (H. G.), "Power flow and information flow in motion control systems". – EPE-PEMC. – Riga (Lettonie), September 2004.
- [70] GEITNER (H. G.). – "Power flow diagrams using a bond graph library under simulink". – IEEE-IECON'06. – Paris (France), November 2006, p. 5282-5288.
- [71] PIQUET (H.), FOCH (H.), DEMNI (H. E.). – « Une méthode de conception en électronique de puissance, à l'aide d'éléments caractérisés ». – 8ème colloque Électronique de Puissance du Futur (EPF). – Lille (France), novembre 2000.
- [72] DEMNI(H. E.). Conception en génie électrique à l'aide d'éléments caractérisés. Thèse de doctorat en Génie Électrique : Institut National Polytechnique de Toulouse (INPT, France). octobre 2004, 203 p.
- [73] HAUTIER (J. P.), FAUCHER (J.). « Le graphe informationnel causal ». Bulletin de l'Union des Physiciens. juin 1996, vol. 90, p. 167-189.
- [74] HAUTIER (J. P.), BARRE (P. J.). – "The causal ordering graph. A tool for system modelling and control law synthesis". – Studies in Informatics and Control Journal (SIC). – December 2004, vol. 13, no. 4, p. 265-283.
- [75] HAUTIER (J. P.), FAUCHER (J.), CARON (J. P.). – « Le graphe informationnel causal, un outil pour analyser, comprendre, représenter ». – Journées 3EI. – Cachan (France), mars 1999.
- [76] A. Bouscayrol, B. Davat, B. de Fornel, B. François, J. P. Hautier, F. Meibody-Tabar, M. Pietrzak-David, "Multi-machine Multiconverter System: Application for Electromechanical Drives", European Physics Journal - Applied Physics, vol. 10, no. 2, pp. 131-147, May 2000.
- [77] J. N. Verhille, Représentation Énergétique Macroscopique du métro VAL 206 et Structures de commande déduites par inversion, Thèse de doctorat ENSAM, juillet 2007, N d'ordre 2007 ENAM 0018.
- [78] W. Lhomme, Ph. Delarue, Ph. Barrade, A. Bouscayrol, "Maximum Control Structure of a series hybrid electric vehicle using supercapacitors", EVS'21, Monaco, April 2005.
- [79] T. Letrouve, A. Bouscayrol, W. Lhomme, "Influence of the Clutch Model in a Simulation of a Parallel Hybrid Electric Vehicle", IEEE VPPC'09, Dearborn, USA, September 2009.
- [80] A. Bouscayrol, P. Delarue, "Simplifications of the Maximum Control Structure of a wind energy conversion system with an induction generator", International Journal of Renewable Energy Engineering, vol. 4, no. 2, pp. 479-485, August 2002.
- [81] A. Bouscayrol, P. Delarue, X. Guillaud, "Power strategies for Maximum Control Structure of a wind energy conversion system with a synchronous machine", Renewable Energy, vol. 30, pp. 2273-2288, May 2005.
- [82] L. Boulon, D. Hissel, A. Bouscayrol, M. C. Péra, From Modeling to Control of a PEM Fuel Cell Using Energetic Macroscopic Representation, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, n 6, pp. 1882-1891, 2010.
- [83] VERGE M., JAUME D., Modélisation structurée des systèmes avec les Bonds Graphs: Technip, 2004.
- [84] Gawthrop, P.J. Bicausal bond graphs. In Proceedings of the International Conference on Bond Graph Modeling and simulation, pages 83–88, Las Vegas, USA, janvier 1995.
- [85] Zadeh, L.A., Desoer, C.A. Linear systems theory : The state space approach. In Series in Systems Science, 628 pages. McGraw-Hill, 1963.
- [86] Weiss, L. On a question related to the control of linear systems. IEEE Transactions on Automatic Control, 9(2) : 176-177, avril 1964.
- [87] Amara, M. Contribution à l'étude des aspects énergétiques en robotique mobile. Thèse, INSA de Lyon, Villeurbanne, France, juin 1991. 300 p.
- [88] Fotsu-Ngwompo, R. Contribution au dimensionnement des systèmes sur des critères dynamiques et énergétiques - approche par Bond Graph. Thèse, INSA de Lyon, Villeurbanne, France, 1997.
- [89] Ngwompo, R.F., Scavarda, S., Thomasset, D. Physical model-based inversion in control systems design using bond graph representation, part 1 : theory. Proceedings of ImechE, Part I : Journal of Systems and Control Engineering, 215(2) :95–103, 2001.
- [90] Ngwompo, R.F., Scavarda, S., Thomasset, D. Physical model-based inversion in control systems design using bond graph representation, part 2 : applications. Proceedings of ImechE, Part I : Journal of Systems and Control Engineering, 215(12) :105–112, 2001.

- [91] Audrey Jardin, Contribution à une méthodologie de dimensionnement des systèmes mécatroniques : analyse structurale et couplage à l'optimisation dynamique, l'INSA de Lyon, janvier 2010.
- [92] J.M. Jonkman, Modelling of the UAE Wind Turbine for Refinement of FAST-AD, National Renewable Energy Laboratory, Task N WER3 2010, NREL/TP-500-34755, December 2003.
- [93] D. Wood, 'The Design and Analysis of Small Wind Turbines', University of Newcastle, School of Engineering, NSW 2308 Australia, 1st Edition of Notes, 2002.
- [94] G. L. Johnson. Wind Energy Systems. Manhattan, KS, electronic edition, December 2001.
- [95] H. Camblon. Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éoliennes dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable. Thèse de doctorat ENSAM Bordeaux, 2004.
- [96] B. Connor and W. Leithead. Investigation of control strategy for 1 MW variable speed wind turbine. Tech. rep, Univ. of Denmark, 1996.
- [97] R. W. Fox, A. T. McDonald, and P. J. Pritchard. Introduction to Fluid Mechanics. Wiley, 6th edition, 2003.
- [98] F. Poitiers, M. Machmoum, and R. Le Doeuff. Simulation of wind energy conversion system based on a doubly-fed induction generator. In 10th European Conference on Power Electronics and Applications, Toulouse, France, September 2003.
- [99] S. Heier. Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems. John Wiley & Sons Ltd, 1998.
- [100] P. M Bongers. Modeling and Identification of Flexible Wind Turbines and a Factorization Approach to Robust Control. PhD thesis, Delft University of Technology, June 1994.
- [101] P. Novak, I. Jovik, and B. Schmidtbauer. Modeling and Identification of drive-system dynamics in a variable-speed wind turbine. In Proceedings of the Third IEEE Conference on Control Applications, volume 1, page 233-238, August 1994.
- [102] P. Sorensen, A. D. Hansen, L. Janosi, J. Bech, and B. Bak-Jensen. Simulation of interaction between wind farm and power systems. Riso Report R-1281 (EN), Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2001.
- [103] H. Vihriala. Permanent magnet generator in wind power plants. Master's thesis, Tampere University of technology 1998.
- [104] X. Ma. Adaptive Extremum Control and Wind Turbine Control. PhD thesis, Danemark, May 1997.
- [105] T. Petru. Modeling of wind turbines for power system studies. Electric power engineering, Chalmers University of Technology; Gotedorg, Sweden, 2003.
- [106] J. Gere and S. P. Timoshenko. Mechanics of Materials. PWS Pub. Co, 5th edition, 2004.
- [107] Iman Poultagari, Reza Shahnazi, Mansour Sheikhan. RBF neural network based PI pitch controller for a class of 5-MW wind turbines using particle swarm optimization algorithm. ISA Transactions 2012; 51:641-48.
- [108] H. Camblong. «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable. Thèse de doctorat en Automatique. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers. Centre de Bordeaux, 2003.
- [109] N. Laverdure, « l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ». Thèse de doctorat de l'Université Grenoble.
- [110] L. Leclercq, « apport de stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes ».
- [111] Abdeldjalil Dahbi, Nasreddine Nait-Said, Mohamed-Said Nait-Said. A novel combined MPPT-pitch angle control for wide range variable speed wind turbine based on neural network. international journal of hydrogen energy (2016) 1-16.
- [112] S. Khojet El Kheil. "Commande Vectorielle d'une Machine Asynchrone Doublement Alimentée (MADA). Thèse de Doctorat de l'institut national Polytechnique de TOULOUSE, 2006.
- [113] K. Jemli. « Power Flow Control and VAR Compensation in a DFIG ». international journal of sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering. 2008, pp.548-565.
- [114] E. Boukas. « Systèmes asservis » Edition de polytechnique de Montréal ,1995.

- [115] P.J. Gawthrop, Physical interpretation of inverse dynamics using bicausal bond graphs. *J. Frankl. Inst.* 2000;337(6): 743–69.
- [116] R.F. Ngwompo, P.J. Gawthrop, Bond graph-based simulation of non-linear inverse systems using physical performance specifications. *J. Frankl. Inst.*1999;336(8):1225–47.
- [117] R.F. Ngwompo, S. Scavarda, D. Thomasset, Physical model-based inversion in control systems design using bond graph representation—part 2: applications. *Proc. IMechE Part I J. Syst. Control Eng.* 2001;215:105–12.
- [118] P.J. Gawthrop, Physical interpretation of inverse dynamics using bicausal bond graphs. *J. Frankl. Inst.*2000;337(6):743–69.
- [119] R.F. Ngwompo, S. Scavarda, Dimensioning problems in system design using bicausal bond graphs. *Simul. Pract. Theory*7, 1999;577–587.
- [120] J.G. Ziegler, N.B. Nichols (1942) : "Optimum settings for automatic controllers." *Trans. ASME*, 64, pp. 759-768.
- [121] K.J. Astrom, T. Hagglund (1995) : *PID Controllers : Theory, Design and Tuning*. Instrument Society of America, 2nd edition, ISBN 1-55617-516-7.
- [122] H. Shayeghi, A. Jalili, H.A. Shayanfar, "Multistage Fuzzy Load Frequency Control Using PSO", *Energy Convers. Manage.*, Vol. 49, pp. 2570-2580, 2008.
- [123] R.A. Krohling, J.P. Rey, "Design of Optimal Disturbance Rejection PID Controllers Using Genetic Algorithm", *IEEE Trans. Evol. Comput.*, Vol. 5, pp. 78- 82, 2001.
- [124] Fernando D. Bianchi, Hernán De Battista and Ricardo J. Mantz. *Wind Turbine Control Systems: Principles, Modelling and Gain Scheduling Design*. 2007.
- [125] Rachid Younsi, Ismail El-Batanony, Jeur-Bernard Tritsch, Hassan Naji, Bernard Landjerit, Dynamic study of a wind turbine blade with horizontal axis, EUDIL, département mécanique, LML, CNRS URA 1441, bd. Paul Langevin, cité scientifique, 59655 Villeneuve d'Ascq cedex, France 2001.
- [126] Shipley D.E., Miller M.S., Robinson M.C., Luttgies M.W., Simms D.A. Evidence that aerodynamic effects, including dynamic stall, dictate HAWT structural loads and power generation in highly transient time frames. In: *WINDPOWER*, AWEA, Minneapolis, pp. 615–626 1994.
- [127] Lee C.-W., Yun J.-S. Dynamic analysis of flexible rotors subject to torque and force. *Journal of Sound and Vibration* 192, 439–452 1996.
- [128] S. Agarwal, L. Chalal, G. Dauphin-Tanguy, X. Guillaud, *Bond Graph Model of Wind Turbine Blade, Bond Graph Modeling: Theory and Practice MathMod Vienna*, 2012.
- [129] I. Lavassas, G. Nikolaidis, P. Zervas, E. Eftimiou, I.N. Doudoumis, C.C. Baniotopoulos, Analysis and design of the prototype of a steel 1-MW wind turbine tower, Department of Civil Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, GR-54124 Thessaloniki, Greece 2003.
- [130] Christopher J. Spruce and Judith K. Turner, *Tower Vibration Control of Active Stall Wind Turbines*, JULY 2013.
- [131] Ragheb Adam, Ragheb Magdi, *Wind Turbine Gearbox Technologies*, INREC10, Amman, Jordan, March 21–24, 2010.
- [132] N. Coudert, G. Dauphin-Tanguy, A. Rault, *Mechatronic Design of an Automatic Gear Box using Bond Graphs*, in: *Proceedings of the IEEE Systems Man and Cybernetics Conference*, 1993.
- [133] Deur Josko, Ivanovic Vladimir, Assadian Francis, Kuang Ming, H. Tseng Eric, Hrovat, Bond graph modeling of automotive transmissions and drivelines, in: *Proceedings of 7th Vienna International Conference on Mathematical Modelling (MATHMOD)*, Vienna, Austria, 2012.
- [134] R. Sanchez, A. Medina. Wind turbine model simulation: A bond graph approach. *Facultad de Ingeniería Eléctrica, División de Estudios de Posgrado, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, 58000 Morelia, Mexico. *Simulation Modelling Practice and Theory* 41 28–45 2014.
- [135] F. Chaari, T. Fakhfakh, and M. Haddar, "Dynamic analysis of a planetary gear failure caused by tooth pitting and cracking," *Journal of Failure Analysis and Prevention*, vol. 6, pp. 73-78, 2006.
- [136] F. Chaari, W. Baccar, M. S. Abbes, and M. Haddar, "Effect of spalling or tooth breakage on gearmesh stiffness and dynamic response of a onestage spur gear transmission", *European Journal of Mechanics-A/Solids*, vol. 27, pp. 691-705, 2008.

- [137] Liu Xiong, Chen Yan, Ye Zhiquan. "Wind turbine computing model of aerodynamic performance with horizontal axis," *Journal of solar*, Beijing, vol. 26, pp. 792-800, Jun 2005.
- [138] M.O.L. Hansen, J.N. Sorensen, S. Voutsinas, N. Sorensen, H.A. Madsen, State of the art in wind turbine aerodynamics and aeroelasticity, *Progress in Aerospace Sciences* 42 285–330 2006.
- [139] J.M. Jonkman, 'Modelling of the UAE Wind Turbine for Refinement of FAST AD', National Renewable Energy Laboratory, Task Num WER3 2010, NREL/TP-500-34755, December 2003.
- [140] D. Wood, 'The Design and Analysis of Small Wind Turbines', University of Newcastle, School of Engineering, NSW 2308 Australia, 1st Edition of Notes, 2002.
- [141] E. Delaleau, J.P. Louis, R. Ortega, Modeling and control of induction motors, *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science* 11 (1) 105-129 2001.
- [142] B. Umesh, L. Umanand. 2008. "Bond graph model of doubly fed three phase induction motor using the Axis Rotator element for frame transformation". *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 16, issue 10, pp. 1704-1712.
- [143] S. Junco. 1999. "Real-and Complex-Power Bond Graph Modeling of the Induction Motor". *Proc. ICBGM'99*. San Francisco, vol. 31, No. 1, pp. 323-328.
- [144] C. Batlle, A. Doria-Cerezo. 2008. "Bond graph models of electromechanical systems. The AC generator case". *IEEE, International Symposium on Industrial Electronics. ISIE'08*, pp. 1064-1069.
- [145] Tore Bakka and Hamid Reza Karimi. Bond graph modeling and simulation of wind turbine systems. University of Agder, Department of Engineering, Faculty of Engineering and Science, 4876 Grimstad, Norway. January 17, 2013.
- [146] Tore Bakka and Hamid Reza Karimi. Wind Turbine Modeling Using The Bond Graph. University of Agder, Department of Engineering, Faculty of Engineering and Science, 4876 Grimstad, Norway. September 28-30, 2011.
- [147] L. Xu, C. Wei, Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless scheme, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 31 (3) (1995) 636–642.
- [148] B. Umesh, L. Umanand. 2008. "Bond graph model of doubly fed three phase induction motor using the Axis Rotator element for frame transformation". *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 16, issue 10, pp. 1704-1712.
- [149] S. Junco. 1999. "Real-and Complex-Power Bond Graph Modeling of the Induction Motor". *Proc. ICBGM'99*. San Francisco, vol. 31, No. 1, pp. 323-328.
- [150] P.C. Krause, O. Wasynczuk, S.D. Sudhoff. 2002. 'Analysis of Electric Machinery and Drive Systems'. A John Wiley & Sons, Inc. Publications, Second Edition.
- [151] S. Junco, Real-and complex-power bond graph modeling of the induction motor, in: *Proc. ICBGM'99*, San Francisco, vol. 31, No. 1, 1999, pp. 323–328.
- [152] J. S. Thongam, Commande de haute performance sans capteur d'une machine asynchrone, Département d'ingénierie, Université du Québec à Chicoutimi (UQAC), Chicoutimi, Juin 2006.
- [153] I. Boldea et S. A. Nasar, *Electric Drives*, 2e ed, CRC Press, 2005.



Annexe A : Éléments constitutifs de formalismes

L'objectif de cette annexe est de présenter les principes de base les éléments constitutifs des formalismes de représentation structurelles suivants : POG (Power-Oriented Graphs), PFD (Power Flow Diagram), Puzzles énergétiques, GIC (Graphe Informationnel Causal) et REM (Représentation énergétique Macroscopique).

Tableau 5.1: Récapitulatif des éléments constitutifs du formalisme POG [ZANASI 96]

POG (Power-Oriented Graphs)			
Le POG est caractérisé par deux types d'éléments qui se représentent par une fonction de transfert : le bloc d'élaboration et le bloc de connexion. Le nombre restreint d'éléments permet d'avoir un apprentissage limité. La causalité intégrale est quasi-exclusive.			
Élément	Symbole	Description	Exemples
Bloc d'élaboration		$G(s)$ de type scalaire ou vectoriel, si vectoriel : $G(s)$ matrice ; stocke et/ou dissipe de l'énergie ; le sommateur représente un couplage, la partie en noir correspond à une entrée négative	ressort, masse, amortisseur, inertie, inductance, condensateur
Bloc connexion		K de type scalaire ou vectoriel, si vectoriel : K matrice ; transforme l'énergie.	réducteur, transformateur électrique, convertisseur électrique

Tableau 5.2: Récapitulatif des éléments constitutifs du formalisme PFD [SCHÄ–NFELD 04]

PFD (Power Flow Diagram)			
Le PFD Étudier les flux de puissance et le rendement énergétique des systèmes. Les liens du Bond Graph sont décomposés en variables de flux et d'effort (variables de puissances généralisées). Cet outil utilise la causalité intégrale.			
Élément	Symbole	Description	Exemples
Source de puissance		source de flux ou d'effort	générateur de courant, générateur de tension
Gyrateur		conversion/transformation d'énergie avec ou non une entrée de réglage	machine électrique
Transformateurs		transformateur d'énergie électrique avec ou non une entrée de réglage	transformateur électrique, convertisseur électrique
		transformateur d'énergie mécanique avec ou non une entrée de réglage	réducteur, engrenage, boîte de vitesses, poulie
Accumulateur d'énergie		stockage d'énergie	inductance, condensateur, ressort, inertie
Dissipateur d'énergie		relation entre effort et flux	résistance électrique, frottement visqueux
Couplage		couplage à partir de sommateurs apparents	couplage série (équi-courant), parallèle en électricité (équi-tension)

Tableau 5.3: Récapitulatif des éléments constitutifs du formalisme Puzzles énergétiques [PIQUET 00]

Puzzles énergétiques			
Les puzzles énergétiques ont été développés pour concevoir des structures de conversion d'énergies utilisées dans le domaine du génie électrique. Les éléments se représentent par des puzzles dont les excroissances correspondent aux variables de flux et d'effort. Cette conception implique nécessairement la causalité intégrale. .			
Élément	Symbole	Description	Exemples
Variables		variable d'effort	tension, couple, pression
		variable de flux	courant, vitesse
Sources		source d'effort	générateur de tension
		générateur de tension	générateur de courant
Intégrateurs		intégrateur d'effort (stockage d'énergie)	inductance électrique
		intégrateur de flux (stockage d'énergie)	condensateur électrique
Gains imposés		gain à effort imposé (dissipation d'énergie)	résistance électrique
		gain à flux imposé (dissipation d'énergie)	admittance électrique
Transformateurs		transformation d'énergie	transformateur électrique, convertisseur électrique
Gyrateurs		gyrateur effort-flux (conversion/transformation)	gyrateur tension-courant, machine électrique
		gyrateur flux-effort (conversion/transformation)	gyrateur courant-tension, pont de diodes avec bus continu
Connexions		connexion équi-effort	connexion équi-tension, couplage parallèle électrique
		connexion équi-flux	gconnexion équi-courant, couplage série électrique

Tableau 5.4: Récapitulatif des éléments constitutifs du formalisme GIC [HAUTIER 96]

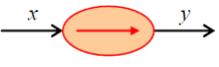
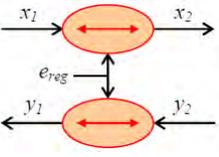
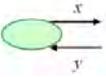
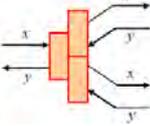
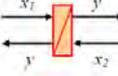
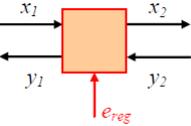
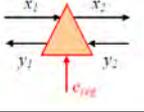
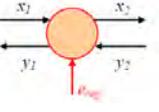
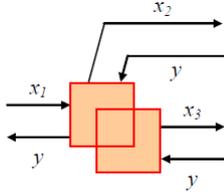
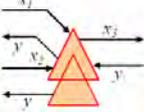
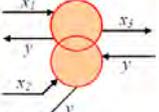
GIC (Graphe Informationnel Causal)			
Le GIC est basé sur la causalité intégrale. Les relations sont classés en deux catégories : relation causale (causalité intégrale, dépendance du temps) et relation rigide (non causale, indépendance du temps). Cette classification permet une systématisation de la structuration de la commande par des règles d'inversion.			
Processeurs		processeur rigide (dissipation ou opérateur d'énergie)	résistance électrique, frottement visqueux, amortisseur
		processeur causal (accumulation d'énergie)	inductance, condensateur, inertie, ressort, masse
Transformateurs		gyrateur ou modulateur avec ou non une entrée de réglage	transformateur électrique, machine électrique, convertisseur électrique

Tableau 5.5: Récapitulatif des éléments constitutifs du formalisme REM [BOUSCAYROL 03]

REM (Représentation Énergétique Macroscopique)			
La REM est une extension du GIC. Elle est donc basée sur la causalité intégrale. Elle met de plus en exergue le principe d'action et de réaction. Elle met également en évidence la notion de couplage qui correspond à la distribution d'énergie du formalisme SMM.			
Variable		variables d'action et de réaction	
Capteur	0	capteur placé sur une variable	
Source		source d'énergie potentielle ou cinétique	alimentation électrique (continue, alternative), environnement d'un véhicule
Aiguilleur		aiguilleur de modèles (aiguillage d'énergie quelconque)	système physique pouvant faire varier le nombre de grandeurs d'états
Accumulateur		élément d'accumulation d'énergie (causalité intégrale) avec ou non des pertes dissipatifs	inductance, condensateur, inertie, masse
Convertisseurs		convertisseur électrique (sans accumulation d'énergie) avec ou non une entrée de réglage	transformateur électrique, convertisseur électrique
		convertisseur mécanique (sans accumulation d'énergie) avec ou non une entrée de réglage	réducteur, engrenage, roue
		convertisseur électromécanique (sans accumulation d'énergie) avec ou non une entrée de réglage	machine à courant continu à excitation séparée
Couplages		couplage électrique	couplage série (équi-courant), parallèle (équi-tension)
		couplage mécanique	poulie-courroie (équi-vitesse)
		couplage électromécanique	machine électrique



Annexe B : Méthodes de Ziegler et Nichols

En 1942, Ziegler et Nichols [1] ont proposé deux approches heuristiques basées sur leur expérience et quelques simulations pour ajuster rapidement les paramètres des régulateurs P, PI et PID. La première méthode nécessite l'enregistrement de la réponse indicielle en boucle ouverte, alors que la deuxième demande d'amener le système bouclé à sa limite de stabilité.

Méthode de la réponse indicielle

Pour obtenir les paramètres du régulateur PID, il suffit d'enregistrer la réponse indicielle du processus seul (c'est-à-dire sans le régulateur), puis de tracer la tangente au point d'inflexion de la courbe. On mesure ensuite sa pente p et le retard apparent L correspondant au point d'intersection de la tangente avec l'abscisse. On peut alors calculer les coefficients du régulateur choisi à l'aide du Tableau 5.17.

Tableau 5.6: Paramètres PID obtenus à partir d'une réponse indicielle

Type	K_p	T_i	T_d
P	$1/pL$		
PI	$0.9/pL$	$3L$	
PID	$1.2/pL$	$2L$	$0.5L$

Généralement les gains K_p proposés par Ziegler-Nichols sont trop élevés et conduisent à un dépassement supérieur à 20%. Il ne faut donc pas craindre de réduire K_p d'un facteur 2 pour obtenir une réponse satisfaisante.

Méthode du point critique

Cette méthode est basée sur la connaissance du point critique du processus. Expérimentalement, on boucle le processus sur un simple régulateur proportionnel dont on augmente le gain jusqu'à amener le système à osciller de manière permanente ; on se trouve ainsi à la limite de stabilité. Après avoir relevé le gain critique K_{cr} du régulateur et la période d'oscillation T_{cr} de la réponse, on peut calculer les paramètres du régulateur choisi à l'aide du Tableau 5.7.

Ici également, les valeurs proposées conduisent à un temps de montée relativement court malheureusement assorti d'un dépassement élevé. Cette situation n'étant pas toujours satisfaisante, on peut être amené à corriger les coefficients proposés et, en particulier, à diminuer le gain K_p .

Tableau 5.7: Paramètres PID obtenus à partir du point critique

Type	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$		
PI	$0.4K_{cr}$	$0.8T_{cr}$	
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5T_{cr}$	$0.125T_{cr}$

On notera que les paramètres T_i et T_d proposés par les deux méthodes de Ziegler-Nichols sont dans un rapport constant égal à 4. Le régulateur possède donc deux zéros confondus valant $-1/(2T_d) = -2/T_i$.

Pour illustrer l'application de la méthode de la réponse indicielle, on utilisera un processus d'ordre 3 d'équation suivant :

$$G(s) = \frac{1}{(s+1)^2} \quad (5.28)$$

La réponse indicielle de ce processus est illustrer sur la Figure ??.

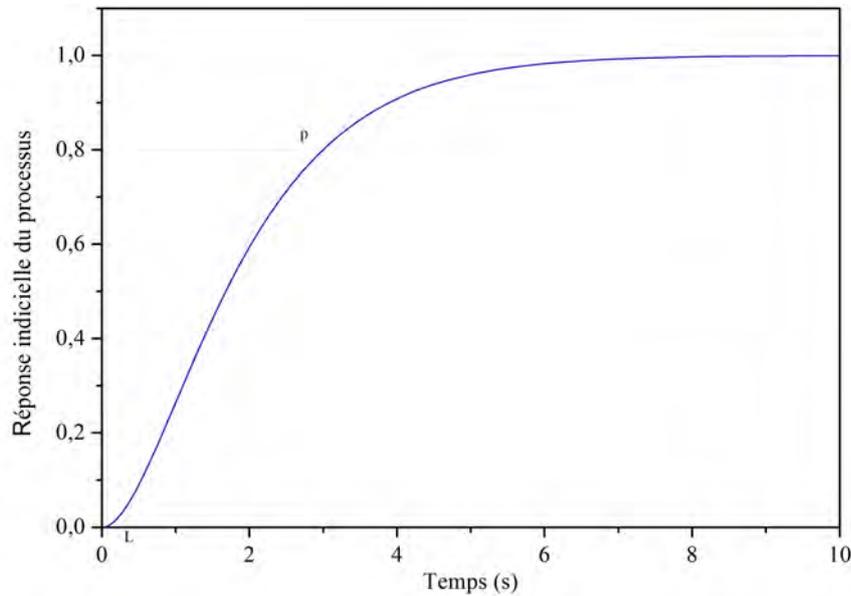


Figure 5.17: Réponse indicielle du processus.

A partir de cette figure n a mesuré: la pente au point d'inflexion ($p = 0.35$) et le retard apparent ($L = 0.31$). Du premier tableau de Ziegler-Nichols, on tire les 3 paramètres du régulateur PID :

$$\begin{cases} K_p = \frac{1.2}{pL} = 11.05 \\ T_i = 2L = 0.62 \\ T_d = 0.5L = 0.155 \end{cases} \quad (5.29)$$



Annexe C : Paramètres de simulations

Paramètres de simulations utilisés dans le Chapitre 3

Wind turbine parameters	
Parameters	Values
Rated turbine power	$P_n = 5MW$
Rotor radius	$R = 55m$
Air density	$\rho = 1.225kg/m^3$
Cut-in wind speed	$v_{cut-in} = 3m/s$
Cut-out wind speed	$v_{cut-out} = 25m/s$
Rated wind speed	$v_{rated} = 12m/s$
Rated generator speed	$\omega_{rated} = 112rad/s$
Rated generator torque	$T_{rated} = 43KNm$
Drive train	
Rotor inertia	$J_{hub} = 5.9145.10^5 Kg.m^2$
Rotor bearing	$D_{hub} = 1000N.m.s/rad$
Main speed shaft stiffness	$K_{ms} = 8.7354.10^8 N.m/rad$
Main speed shaft damping	$D_{ms} = 6.3478.10^5 N.m.s/rad$
Gearbox ratio	$N = 60 : 1$
High speed shaft stiffness	$K_{hs} = 10^8 N.m/rad$
High speed shaft damping	$D_{hs} = 1.3^3 N.m.s/rad$
Generator inertia	$J_{ind} = 18.7kg.m^2$
Generator friction coefficient	$D_{ind} = 0.1N.m.s/rad$
Pitch system	
motor Resistance	$R = 3.9\Omega$
motor inductance	$L = 4.10^{-3}H$
emf constant	$K = 0.4$
Rotor inertia of the motor	$J_{mind} = 10^{-3}Kg.m^2$
Rotor bearing of the motor	$f_{ind} = 0.01N.m.s/rad$
gearbox ratio	$N_p = 0.016$
blade inertia	$J_{blade} = 800Kg.m^2$
blade dampind	$D_{blad} = 2.3.10^5 N.m.s/rad$
blade stiffness	$K_{blade} = 1.7.10^7 N.m/rad$

Paramètres de simulations utilisés dans les Chapitres 4 et 5

Blade structure data			
Parametres	Section 1	Section 2	Section 3
E , Young modulus of blade material (N/m^2)	$1,71.10^9$	$1,71.10^9$	$1,71.10^9$
G , Coulomb modulus of blade material (N/m^2)	$6,58.10^9$	$6,58.10^9$	$6,58.10^9$
I_x , The second moments of area of axe $x(m^4)$	$7,7.10^{-5}$	5.10^{-4}	$6,2.10^{-5}$
I_y , The second moments of area of axe $y(m^4)$	$3,85.10^{-3}$	$2,5.10^{-3}$	$3,1.10^{-4}$
J , Second moment polar (m^4)	$4,62.10^{-5}$	$5,2.10^{-5}$	$2,6.10^{-5}$
L , Element length (m)	7,8	7,8	7,8
M , Mass of section (kg)	928	560	207
J_t , Inertial mass of section ($kg.m^2$)	26	13,78	1,66
μ , Structural damping coefficient	0,01	0,01	0,01
Blade aerodynamic conversion			
r , Position on the center of gravity (m)	3,9	11,7	19,5
c , Cord (m)	1,56	1,459	0,8315
β_t , Twist angle (<i>degree</i>)	7,65	4,53	2,72
ρ , Air density (kg/m^3)	1,225	1,225	1,225
z_a , Coordinate of the aerodynamic center (m)	0,2652	0,25	0,14
y_G , Coordinates of the center of gravity (m)	0,5	0,47	0,226
z_G , Coordinates of the center of gravity (m)	0,11	0,102	0,06
Tower			
E , Young modulus of tower material (N/m^2)	210.10^9	210.10^9	210.10^9
I , The second moments of area (m^4)	1,474	0,414	0,826
L , Element length (m)	22,33	22,33	22,33
M , Element length (kg)	$56,214.10^3$	$38,581.10^3$	$23,901.10^3$
J_t , Inertial mass of section ($kg.m^2$)	$1,99.10^5$	$1,064.10^5$	5.10^4
μ , Structural damping coefficient	0,01	0,01	0,01

Hub and main shaft		Generator	
J_{hub} , Hub inertia ($kg.m^2$)	5000	V_n , Voltage of electrical network (V)	460
D_{hub} , Main bearing ($N.s/m$)	1000	f , Frequency network (Hz)	50
K_{ms} , Main shaft stiffness (N/m)	$3,67.10^7$	R_s , Stator resistance (Ω)	$4,92.10^{-4}$
D_{ms} , Main shaft bearing ($N.s/m$)	200	R_r , Rotor resistance (Ω)	$2,7.10^{-4}$
High speed shaft		p , Number of poles	2
K_{hs} , High shaft speed stiffness (N/m)	10^7	L_{ls} , Self-inductance of stator (H)	$4,66.10^{-5}$
D_{hs} , High shaft bearing ($N.s/m$)	54,5	L_m , Mutual inductance (H)	$1,99.10^{-3}$
Laod		J_{ind} , Rotor inertia ($kg.m^2$)	18,7
R , Charge resistance Ω	20		
L , Charge inductance H	0,1		
Gearbox			
J_s , Sun inertia ($kg.m^2$)	3,2	K_{rg} , Mesh stiffness between ring and hub (N/m)	$29,2.10^9$
J_r , Ring inertia ($kg.m^2$)	144,2	D_{rg} , Mesh damping between ring and hub ($N.s/m$)	10^6
J_c , Carrier inertia ($kg.m^2$)	59,1	K_{st1} , Mesh stiffness of first shaft of parallel gearbox (N/m)	$5,28.10^5$
J_p , Planet inertia ($kg.m^2$)	3,2	D_{st1} , Mesh damping of first shaft of parallel gearbox ($N.s/m$)	$5,8.10^2$
J_1 , Parallel gear 1 inertia ($kg.m^2$)	11,4	K_{st2} , Mesh stiffness of second shaft of parallel gearbox (N/m)	$7,3.10^5$
J_2 , Parallel gear 2 inertia ($kg.m^2$)	3,2	D_{st2} , Mesh damping of second shaft of parallel gearbox ($N.s/m$)	8.10^2
J_3 , Parallel gear 3 inertia ($kg.m^2$)	8,16	K_1 , Mesh stiffness between parallel gear 1 and 2 (N/m)	$13,5.10^9$
J_4 , Parallel gear 4 inertia ($kg.m^2$)	3	D_1 , Mesh damping between parallel gear 1 and 2 (N/m)	$6,23.10^3$
Z_s , Number of planetary thee	21	K_2 , Mesh stiffness between parallel gear 3 and 4 (N/m)	$9,8.10^9$
Z_r , Number of ring thee	99	D_2 , Mesh damping between parallel gear 3 and 4 ($N.s/m$)	$4,67.10^3$
Z_p , Number of sun thee	39	K_{sp} , Mesh stiffness between sun and planet (N/m)	$16,9.10^6$
Z_1 , Number of parallel gear 1 thee	70	D_{sp} , Mesh damping between sun and planet ($N.s/m$)	$4,65.10^3$
Z_2 , Number of parallel gear 2 thee	20	K_{rp} , Mesh stiffness between ring and planet (N/m)	$19,2.10^9$
Z_3 , Number of parallel gear 3 thee	51	D_{rp} , Mesh damping between ring and planet ($N.s/m$)	$2,24.10^4$
Z_4 , Number of parallel gear 4 thee	17		

RÉSUMÉ

Les turbines éoliennes sont des systèmes de production d'énergie électrique à partir de l'énergie cinétique du vent. Les comportements dynamiques de ces systèmes sont difficiles à maîtriser. Ceux-ci sont liés fondamentalement à des interconnexions mal maîtrisées entre les sous-systèmes. Une réflexion sur les différents modèles de la turbine éolienne existants dans la littérature met en évidence un manque des détails de modélisation ainsi que l'absence de prise en compte des interactions énergétiques entre les sous-systèmes. Ces lacunes rendent difficiles l'analyse et la maîtrise des comportements dynamiques de ce système. Dans cette thèse, une approche mécatronique de représentation multiphysique et multiniveaux appliqués aux systèmes de production éolienne a été proposée : la turbine éolienne est considérée comme un système mécatronique multidisciplinaire comprenant différents domaines de la physique comme l'aérodynamique, la mécanique, l'électromécanique, l'électronique de puissance et le système de commande. Ces sous-systèmes sont modélisés en détail et les interactions entre eux sont bien prises en compte. Cette démarche offre une vision énergétique, globale et structurelle pour la maîtrise de la dynamique de ce système complexe. Une réflexion sur les outils de modélisation des systèmes mécatroniques existants a conduit au choix du Bond Graph en tant qu'outil fondamental pour la modélisation des différents éléments du système, l'analyse des propriétés des modèles et la conception des lois de commande. La fiabilité du modèle proposé et la robustesse des lois de commande ont été vérifiées par des simulations.

Mots clés : *Mécatronique, Turbine éolienne, Bond Graph, Causalité, Modèle inverse, Bicausalité, Commande.*

ABSTRACT

Wind turbines are electric power generation systems that involve dynamic behaviors that are difficult to control. These behaviors are mainly related to poorly controlled couplings between certain subsystems. A state of the art on the existing modeling practices highlights a lack of consideration of energetic interactions between the subsystems, making it difficult to analyze and control these phenomena and leading to point solutions. This work provides an introduction to a mechatronic approach to multiphysical and multilevel representation applied to wind power systems, that is to say, considering the wind system as a multi-domain mechatronics system including various areas of physics such as aerodynamics, mechanics, electromechanics, power electronics and electrical sub-systems. This approach offers an energetic, global and structural vision to master the dynamics of this complex system. A reflection on the existing tools of representation led to the choice of the Bond Graph as a fundamental tool for: modeling the different elements, the analysis of the models properties and the design of inverse model control laws using the bicausality. The reliability of the proposed model and the robustness of the control were validated by simulations.

Keywords: *Mechatronics, Wind Turbine, Bond Graph, Causality, Inverse Model, Bicausality, Control.*