



N° d'ordre 08/2016

## THESE DE DOCTORAT

Présentée par

**Mme : Jamila El Haini**

**Spécialité : Mécanique Énergétique**

Sujet de la thèse :

**L'approche réseau physique dans la modélisation des systèmes complexes- cas des systèmes hybrides éoliens, photovoltaïques.**

**Thèse présentée et soutenue le 22-02-2016 devant le jury composé de**

Nom Prénom	Titre	Etablissement	
Pr. Ouazzani Chahdi Taoufik	PES	Université euro-méditerranéenne de Fès	Président
Pr. Aarab Abdellah	PES	Faculté des Sciences Dhar El Mahraz, Fès	Rapporteur
Pr. El Khalfi Ahmed	PES	Faculté des Sciences et Techniques de Fès	Rapporteur
Pr. Sabbane Mohamed	PES	Faculté des Sciences My Ismail, Meknès	Rapporteur
Pr. Yousfi Ahmed	PH	Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Fès	Examineur
Pr. Saka Abdelmjid	PES	Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Fès	Directeur de thèse

Laboratoire d'accueil : Génie Mécanique

Etablissement : Faculté des Sciences et Techniques de Fès

Laboratoire d'accueil : Laboratoire d'Ingénierie, Systèmes et Applications

Etablissement : Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Fès



## Résumé de la thèse

L'objectif de ce travail de thèse est d'exploiter les avantages de l'approche de modélisation réseau physique en matière de réduction du temps et de l'effort de modélisation des systèmes physiques.

L'approche réseau physique qui permet une modélisation acausale, orientée objet et multidomaine, rend facile la construction du modèle d'un système complexe en interconnectant les modèles blocs de ses composants au moyen de relations physiques et mathématiques.

A cet effet, nous modélisons dans MATLAB/SIMSCAPE, l'outil puissant basé sur l'approche réseau physique, un système éolien, un système photovoltaïque et un système hybride Eolien/Photovoltaïque. Pour la modélisation, l'éolienne à vitesse fixe à génératrice asynchrone à cage d'écureuil et le système photovoltaïque choisis, sont considérés raccordés au réseau alors que le système hybride est pris autonome et alimente une charge domestique. Les modèles élaborés prouvent l'avantage de SIMSCAPE et les résultats de simulation démontrent la validité de ces modèles.

Nous modélisons aussi sous SIMSCAPE, l'éolienne avec les systèmes de contrôle FACTS : le STATCOM, le SSSC et le STATCOM/Batterie afin de comparer leurs performances en matière de l'amélioration de la capacité de l'éolienne à surmonter les sous tensions en cas d'un incident sur le réseau. Les résultats de simulation prouvent que le dispositif STATCOM avec une batterie de stockage est le plus performant.

Nous proposons aussi dans ce travail, une nouvelle méthode multi-objective d'optimisation de dimensionnement du système hybride Eolien/Photovoltaïque. Cette méthode basée sur les algorithmes génétiques, vise la minimisation du coût global de l'installation et la maximisation de sa fiabilité basée sur la méthode des moindres carrés. Ce système ainsi optimisé est modélisé en utilisant l'approche réseau physique et aussi la modélisation logique que présente STATEFLOW.

**Mots clés** : Approche réseau physique, Modèle SIMSCAPE, Optimisation multi-objective, Modélisation logique avec Stateflow, Contrôle, Systèmes Eolien/Photovoltaïque, Système hybride.



# Table des matières

<u>Dédicaces</u> .....	i
<u>Remerciement</u> .....	ii
<u>Résumé</u> .....	iii
<u>Abstract</u> .....	iv
<u>Tables des matières</u> .....	v
<u>Liste des figures</u> .....	xii
<u>Liste des Tableaux</u> .....	xvi
<u>Introduction générale</u> .....	1
<b><u>Chapitre I. Revue de littérature portant sur la modélisation des systèmes d'énergie renouvelable</u></b> .....	3
1. Modélisation et contrôle des systèmes éoliens, photovoltaïques et hybrides .....	3
1.1. Modélisation orientée bloc et modélisation réseau physique.....	3
1.2. Modélisation des éoliennes .....	5
1.3. Modélisation des panneaux photovoltaïques .....	7
1.4. Modélisation du système hybride .....	9
1.5. Limitations .....	12
2. Système FACT pour le contrôle des éoliennes.....	12
2.1. Vue d'ensemble des systèmes FACTS .....	12
2.1.1. Régulateur de charge universel (UPFC) .....	13
2.1.2. Compensateur statique série synchrone SSSC.....	14
2.1.3. Compensateur d'énergie réactive shunt SVC.....	15
2.1.4. Condensateur série commandé par thyristors .....	16
2.1.5. Compensateur statique synchrone (STATCOM) .....	17
2.2. FACTS avec un système de stockage d'énergie.....	17
2.3. Besoins dans la littérature.....	18
3. Optimisation du système d'énergie hybride .....	19
3.1. Objectifs de conception .....	19
3.1.1. Minimisation des coûts .....	19
3.1.2. Autres objectifs.....	21
3.2. Objectif unique vs objectifs multiples .....	22
3.3. Techniques et algorithmes d'optimisation.....	23

3.3.1. Techniques d'optimisation mono-objectives.....	23
3.3.2. Techniques d'optimisation multi-objectives.....	24
3.4. Perspective d'optimisation du système hybride.....	25
4. Conclusion.....	26
<b><u>Chapitre 2. Introduction à la Modélisation et à la Simulation</u></b> .....	27
1. Système et expérience.....	27
1.1. Système.....	27
1.2. Expérience.....	27
2. La modélisation.....	28
2.1. Concept du modèle .....	28
2.2. Intérêt de la modélisation .....	28
2.3. Types de modèles .....	29
2.4. Types des modèles mathématiques.....	29
3. La simulation.....	30
4. Cycle de conception .....	30
4.1. Cycle de développement .....	30
4.2. Représentations d'une conception.....	31
4.3. Niveaux d'abstraction .....	32
4.4. Méthodes de conception .....	33
4.4.1. Conception ascendante (down-top).....	33
4.4.1. Conception descendante (top-down) .....	33
4.4.1. Conception mixte .....	33
5. Approches de conception .....	33
5.1. Approche traditionnelle .....	33
5.2. Conception modélisée ou conception à base de modèles .....	34
5.3. Entrée –sortie méthode .....	34
5.4. Approche réseau physique .....	35
5.4.1. Modélisation acausal .....	36
5.4.2. Modélisation multidomaine.....	38
5.4.3. Modélisation orientée objet .....	38
5.5. Exemple comparant entre l'approche entrée sortie et celle réseau physique .....	38



6. Conclusion.....	42
<b>Chapitre 3: Le langage de modelisation et de simulation Simscape basé sur l'approche</b>	
<b><u>réseau physique</u></b> .....	43
1 Principes de base de la modélisation physique avec Simscape.....	43
1.1. Introduction .....	43
1.2. Connecteurs et variables associés.....	43
1.3. Direction des variables.....	45
1.4. Connexion des diagrammes Simscape avec Simulink.....	46
2. Bibliothèques Simscape .....	46
2.1. La bibliothèque « Foundationlibrary » .....	46
2.2. Bibliothèque d'utilitaires .....	47
2.3. Produits Simscape.....	47
3. Langage Simscape .....	49
3.1. Introduction .....	49
3.2. Fichiers Simscape.....	49
3.2.1. Type du fichier Simscape .....	49
3.2.2. Types de modèles .....	50
3.2.3. Structure des fichiers de base .....	50
3.3. Création d'un nouveau domaine physique.....	50
3.4. Création d'un nouveau composant.....	51
3.4.1. Section 'Déclaration' .....	52
3.4.2. Section 'setup' ou configuration .....	52
3.4.3. Section 'Equation' .....	53
3.5. Ajout d'un bloc personnalisé .....	54
3.5.1. Organisation des fichiers Simscape.....	54
3.5.2. Protection des fichiersSimscape.....	54
3.5.3. Construction d'un composant personnalisé .....	54
3.6. Etude de cas: création d'un bloc personnalisé .....	55
3.6.1. Construire une bibliothèque personnalisée.....	55
3.6.2. Ajouter le bloc condensateur .....	55
3.6.3. Ajouter des détails au composant.....	56
3.6.4. Personnalisation de l'icône de bloc .....	58

4. Conclusion.....	59
<b>Chapitre 4 : Modélisation d'une éolienne dans Simscape .....</b>	<b>60</b>
1. Généralités sur les éoliennes .....	60
1.1. Historique .....	60
1.2. Production éolienne.....	61
1.3. Types d'éoliennes .....	61
1.3.1. Eoliennes à axe vertical .....	61
1.3.2. Eoliennes à axe horizontal .....	62
1.3.2.1. Eoliennes lentes .....	62
1.3.2.2. Eoliennes rapides .....	63
1.4. Principaux composants d'une éolienne .....	63
1.4.1. Le mât .....	64
1.4.2. La nacelle .....	64
1.4.3. Le rotor .....	64
1.4.3.1. Rotors à vitesse fixe .....	65
1.4.3.2. Rotors à vitesse variable .....	65
1.5. Puissance aérodynamique capturée par l'éolienne et coefficient de puissance.....	65
1.6. Contrôle au niveau de la turbine .....	68
1.6.1. Action du vent sur une pale .....	68
1.6.2. Décrochage aérodynamique et calage variable des pales.....	70
1.7. Machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne .....	71
1.7.1. Générateur synchrone.....	71
1.7.2. Générateur asynchrone.....	72
1.7.2.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil .....	72
1.7.2.2. Machine asynchrone à double alimentation .....	73
1.7.3. Comparaison entre les différentes génératrices pour les éoliennes .....	73
2. Modélisation d'une éolienne sous Simscape.....	74
2.1. Introduction .....	74
2.2. Modèle de l'éolienne .....	75
2.3. Modélisation du couple aérodynamique.....	76
2.4. Modèle du rotor .....	77
2.5. Modèle du multiplicateur.....	78
2.6. Modèle du générateur .....	79
2.7. Modèle du moteur à courant continu.....	80
2.8. Modèle du système de freinage.....	81



2.9. Modèle de la protection de l'éolienne .....	83
3. Résultats de simulation et discussions.....	84
3.1. Résultats de simulation sans compensation de l'énergie réactive .....	84
3.2. Résultats de simulation avec compensation de l'énergie réactive.....	86
3.3. Résultats de simulation pour une vitesse du vent de 27 m/s.....	87
4. Conclusion.....	89
<b><u>Chapitre 5. Modélisation physique des panneaux solaires</u></b> .....	90
1. Point sur l'énergie solaire .....	90
1.1. Introduction .....	90
1.2. Energie solaire.....	90
1.3. Conversion d'énergie : les différentes technologies solaires .....	91
1.3.1. Solaire à concentration thermodynamique .....	91
1.3.2. Solaire thermique.....	91
3.3. Solaire photovoltaïque .....	93
2. Energie photovoltaïque .....	93
2.1. Générateur photovoltaïque .....	93
2.2. Technologies des cellules solaires .....	94
2.2.1. Cellule cristalline.....	94
2.2.2. Cellule amorphe .....	95
2.3. Module et panneau Photovoltaïques.....	95
2.4. Kilowatt-crête.....	96
3. Modélisation d'un panneau solaire sous Simscape .....	96
3.1. Introduction .....	96
3.2. Modèle du générateur photovoltaïque dans Simscape.....	96
3.2.1. Bloc panneaux solaires .....	97
3.2.2. Protection du système.....	98
3.2.2.1. Sectionneur .....	98
3.2.2.2. Disjoncteur.....	99
3.2.2.3. Parafoudre .....	99
3.3. Résultats de la simulation .....	101
4. Conclusion.....	101
<b><u>Chapitre 6. Analyse de performance et Contrôle d'une éolienne raccordée au réseau</u></b> ....	102
1. Survol sur les exigences du réseau .....	102
1.1. Réseau faible ou fort.....	103

1.2. Exigences en contrôle de puissance .....	103
1.3. Exigence en matière de sous-tension .....	104
2. Modélisation d'une éolienne à génératrice asynchrone à cage d'écureuil en cas de défaut .....	104
2.1. Introduction .....	104
2.2. STATCOM.....	106
2.2.1. Présentation et principe de fonctionnement.....	106
2.2.2. Modélisation du STATCOM .....	107
2.2.3. Contrôle du STATCOM.....	108
2.3. Compensateur statique série synchrone SSSC.....	110
2.4. Combinaison STATCOM / système de stockage .....	111
2.5. Modélisation de l'éolienne en présence du défaut .....	114
2.5.1. Modèle du système avec STATCOM.....	114
2.5.2. Modèle du système avec SSSC .....	115
2.5.3. Modèle du système avec STATCOM/Batterie .....	116
1.5.4. Résultats de la simulation .....	117
3. Conclusion.....	119

### **Chapitre 7: dimensionnement optimal et modélisation physique du système hybride PV**

<b><u>Eolien</u></b> .....	121
1. Etat de l'art sur les systèmes d'énergie hybrides .....	121
1.1. Introduction .....	121
1.2. Présentation d'un système hybride.....	122
1.3. Classification des systèmes hybrides.....	122
1.3.1. Systèmes hybrides avec source d'énergie conventionnelle .....	123
1.3.1.1. Systèmes photovoltaïque/source conventionnelle .....	123
1.3.1.2. Systèmes éolien/source conventionnelle.....	123
1.3.1.3. Systèmes photovoltaïque/éolien/diesel.....	124
1.3.2. Systèmes hybrides sans source conventionnelle.....	124
1.3.2.1. Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage.....	124
1.3.2.2. Système hybride éolien/stockage.....	124
1.3.2.3. Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage .....	125
1.4. Architecture DC ou AC.....	125
1.4.1. Couplage DC .....	125
1.4.2. Couplage AC.....	126
1.4.3. Couplage mixte AC/DC .....	127



2. Dimensionnement et optimisation du système hybride PV-Eolien .....	127
2.1. Système PV-Eolien domestique.....	127
2.1.1. Présentation du système.....	127
2.1.2. Système alterné ou parallèle.....	128
2.2. Données météorologiques et charges .....	128
2.2.1. Site d'implantation .....	128
2.2.2. Consommation en électricité d'une maison type .....	129
2.3. Dimensionnement du système .....	131
2.3.1. Dimensionnement de l'éolienne .....	131
2.3.2. Dimensionnement du module photovoltaïque.....	131
2.3.3. Dimensionnement de la batterie .....	131
2.4. Optimisation du système .....	132
2.4.1. Introduction.....	132
2.4.2. Probabilité de perte d'alimentation.....	132
2.4.3. Méthode des moindres carrés .....	132
2.5. Optimisation multi-objective du système basée sur la méthode des moindres carrés .....	133
2.5.1. Introduction.....	133
2.5.2. Fonction objective 'coût' .....	134
2.5.3. Fonction objective somme des moindres carrés .....	135
2.5.4. Optimisation des deux fonctions objectives coût et somme des moindres carrés .....	136
3. Modélisation du système hybride PV-Eolien sous SIMSACPE .....	137
3.1. Introduction .....	137
3.2. Modèle du système hybride PV-Eolien sous SIMSCAPE.....	137
3.2.1. Modèle du bloc 'charge' .....	138
3.2.2. Le modèle du bloc 'Mesure' .....	140
3.2.3. Organigramme STATEFLOW .....	140
3.3. Résultats de la simulation et discussions .....	142
4. Conclusion.....	144
<b>Conclusion générale et perspectives</b> .....	146
<b>Annexe</b> .....	184