



**Centre d'Etudes Doctorales : Sciences et Techniques de l'Ingénieur**

Fès, le 12/ 12/2012

N° d'ordre : 8/2012.

**THESE DE DOCTORAT**

Présentée par

**Mr : Benaïssa EL FAHIME**

Spécialité : Génie mécanique

Sujet de la thèse :

**CONTRIBUTION A UNE METHODOLOGIE DE TOLERANCEMENT  
DES SYSTEMES MECATRONIQUES**

Thèse présentée et soutenue le 28/12/2012 devant le jury composé de :

MRABTI Mostafa	PES	ENSA de Fès	Président
BOUOULID IDRISSE Badr	PES	ENSAM de Meknès	Rapporteur
EL KHALFI Ahmed	PES	FST de Fès	Rapporteur
EL MARJANI Abdellatif	PES	EMI de Rabat	Rapporteur
RADOUANI Mohamed	PH	ENSAM de Meknès	Examineur
SAKA Abdelmjid	PES	ENSA de Fès	Directeur de thèse

Laboratoire d'accueil : Laboratoire Génie Mécanique.

Etablissement : Faculté des Sciences et Techniques – Fès.



## **Résumé de la thèse**

Cette thèse s'inscrit dans le cadre de la modélisation des systèmes mécatroniques et traite plus spécifiquement le problème de leur tolérancement. Dans ce sens, elle s'intéresse aux méthodes permettant la modélisation des composants constituant leurs chaînes d'actionnement afin de satisfaire au mieux un cahier des charges donné.

La pluridisciplinarité de ces systèmes permet d'envisager des solutions originales qui n'avaient jusqu'alors pas été explorées ou autorisées par de nouvelles avancées technologiques, celle-ci demande également un changement de méthode dans le processus de conception. Les démarches adoptées pour traiter ce type de problème se doivent d'être les moins coûteuses en termes financiers mais aussi en termes de temps d'étude.

Pour diminuer le nombre d'itérations du processus de conception, une solution possible est l'utilisation du formalisme Bond Graph qui est en bonne adéquation avec une approche système en général, il est bien adapté à la conception mécatronique. En effet, les Bonds Graphs favorisent l'échange interdisciplinaire, la capitalisation de connaissance et la conception/modélisation/analyse des systèmes complexes (hétérogènes et multi-domaines). Un modèle Bond Graph offre la possibilité d'étudier les différents niveaux d'information d'un système (architecture, structure énergétique, phénoménologie, paramétrage numérique), et par conséquent la possibilité de traiter différents problèmes relatifs à différents niveaux du cycle de conception.

Dans la modélisation physique par les bonds graphs, les paramètres sont explicitement représentés par des éléments parfaits de type résistif  $R$ , capacitif  $C$ , inductif et inertiel  $I$ , etc. Les résultats des simulations avec des paramètres idéaux sont utiles pour vérifier les performances globales du système. Cependant, une conception nominale ne garantit pas nécessairement la robustesse de système. La prise en compte des tolérances est un point crucial pour l'étude de la robustesse en modélisation et au contrôle des systèmes mécatroniques. Dans cette optique, la contribution de nos recherches vise à étendre la modélisation Bond Graph en introduisant certains défauts des produits mécatroniques en phase de conception, permettant ainsi la maîtrise des variations de plusieurs paramètres de domaines physiques différents et leurs effets sur le fonctionnement du système. Ainsi nous allons contribuer à la modélisation et la maîtrise des variabilités en phase de conception des produits mécatroniques.

**Mots clés** : Systèmes mécatroniques, Tolérancement, Modélisation physique, Bonds graphs.

## TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE .....	6
 <b>CHAPITRE 1: LES SYSTEMES MECATRONIQUES : CONCEPTION ET MODELISATION</b>	
1.1 Introduction .....	11
1.2 Qu'est-ce qu'un système mécatronique ?.....	12
1.2.1. La Mécatronique .....	12
1.2.2. Systèmes mécatroniques .....	15
1.3 Conception d'un système mécatronique.....	18
1.3.1. La conception traditionnelle des systèmes complexes.....	18
1.3.2. Approche de la conception mécatronique (norme VDI 2206).....	19
1.4 Modélisation d'un système mécatronique.....	21
1.4.1. Niveaux d'abstraction de la conception .....	22
1.4.2. Prototypage virtuel .....	26
1.4.3. Méthodes et outils informatiques pour la mécatronique .....	28
1.5 Conclusion .....	31
 <b>CHAPITRE 2 : PROBLEMATIQUE DE TOLERANCEMENT DES SYSTEMES MECATRONIQUES</b>	
2.1 Introduction .....	33
2.2 Sources de variations en production .....	34
2.3 Besoin en tolérancement .....	36
2.3.1 Tolérancement dans la phase de la conception.....	37
2.3.2 Tolérancement dans la phase de la fabrication .....	38
2.3.3 Tolérancement dans la phase du contrôle.....	39
2.4 Analyse et synthèse de tolérances.....	42
2.4.1 Méthodes de synthèse des tolérances.....	43
2.4.2 Méthodes d'analyse des tolérances .....	44
2.4.2.1 <i>Analyse déterministes "Au pire des cas"</i> .....	46
2.4.2.2 <i>Analyse statistiques</i> .....	46
2.5 Outils informatiques d'assistance au tolérancement.....	54
2.6 Conclusion .....	56

**CHAPITRE 3 : MODELISATION EN MECATRONIQUE : UNE APPROCHE ORIENTEE  
"BOND GRAPH"**

3.1	Introduction .....	58
3.2	Langage Bond Graph.....	59
3.2.1	Généralités.....	60
3.2.2	Eléments standards.....	62
3.3	Approche orientée Bond Graph .....	69
3.3.1	Construction d'un modèle Bond-Graph.....	69
3.3.2	Dérivation du modèle mathématique d'un Bond Graph .....	72
3.3.3	Logiciels.....	80
3.4	Modélisation mécatronique avec les Bonds Graphs .....	80
3.4.1	Modélisation multi-domaine.....	80
3.4.2	Modélisation orientée objet .....	81
3.4.3	Modélisation acausale, modélisation causale.....	82
3.5	Modélisation multi-physique : étude de cas.....	84
3.5.1	Application : Contexte et description.....	84
3.5.1.1	<i>Modèle Bond Graph du motoréducteur .....</i>	<i>84</i>
3.5.1.2	<i>Modèle Bond Graph du mécanisme bielle manivelle .....</i>	<i>86</i>
3.5.2	Implémentation du modèle Bond Graph .....	87
3.5.2.1	<i>Modélisation multi-physique avec 20-sim®.....</i>	<i>87</i>
3.5.2.2	<i>Simulation du système mécatronique .....</i>	<i>89</i>
3.6	Conclusion .....	91

**CHAPITRE 4 : TOLÉRANCEMENT MÉCATRONIQUE**

4.1	Introduction .....	93
4.2	Tolérancement statistique multi-physique.....	93
4.2.1	Simulation de Monte Carlo .....	94
4.2.2	Algorithme de tolérancement mécatronique.....	97
4.3	Tolérancement mécatronique : étude de cas .....	99
4.3.1	Tolérancement mono-domaine .....	99
4.3.1.1	<i>Analyse des tolérances mono-domaine "au pire des cas" .....</i>	<i>99</i>
4.3.1.2	<i>Analyse des tolérances mono-domaine avec la méthode SMC .....</i>	<i>102</i>
4.3.1.3	<i>Optimisation des tolérances.....</i>	<i>105</i>
4.3.2	Tolérancement multi-domaine.....	105
4.3.2.1	<i>Tolérancement multi-domaine "au pire des cas" .....</i>	<i>105</i>
4.3.2.2	<i>Tolérancement multi-domaine avec la méthodes SMC.....</i>	<i>107</i>
4.3.2.3	<i>Optimisation des tolérances.....</i>	<i>110</i>
4.4	Conclusion .....	113
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>		<b>114</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>		<b>118</b>
<b>ANNEXE .....</b>		<b>122</b>