



THESE DE DOCTORAT DE

L'UNIVERSITE ABDELMALEK ESSAADI

CENTRE D'ETUDES DOCTORALES :

Sciences et Techniques de l'Ingénieur

L'UNIVERSITE D'ANGERS

COMUE UNIVERSITE BRETAGNE LOIRE

ECOLE DOCTORALE N° 602
Sciences pour l'Ingénieur

Spécialité : «**Génie Mécanique, Mécatronique et systèmes Industriels**»

Par «**Nabil BEN SAID AMRANI**»

«**Évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques en phase de développement**»

Thèse présentée et soutenue à «Tanger», le «**01 Juillet 2019**»

Unité de recherche : Laboratoire des Technologies Innovantes, ENSA de Tanger

Unité de recherche : Laboratoire Angevin de Recherche en Ingénierie des Systèmes, POLYTECH'Angers

Rapporteurs avant soutenance :

Abdelkhalak ELHAMI
Bouchaib EL RADI
Abderrazzak BOUMANE

Professeur des universités, INSA de Rouen
Professeur d'enseignements supérieurs, FST de Settat.
Professeur Habilité, ENSA de Tanger.

Composition du Jury :

Président :	Abderrahmane SBIHI	Professeur d'enseignements supérieurs, ENSA de Tanger.
Examineur:	Abdessamad KOBİ d'Angers	Professeur des Universités, Polytech'Angers, Université
Directeur de thèse :	Driss SARSRI	Professeur Habilité, LTI, ENSA de Tanger, Université UAE
Co-directrice de thèse :	Mihaela BARREAU	Maître de conférences HDR, LARIS, Polytech'Angers, Université d'Angers
Co-encadrant :	Laurent SAINTIS	Maître de conférences, LARIS, Polytech'Angers, Université d'Angers

Remerciements

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'une convention de thèse en co-tutelle Internationale, entre le laboratoire LARIS-Polytech Angers, France et le laboratoire LTI-ENSA de Tanger, Maroc.

Ce travail a été dirigé au Maroc par Monsieur **Driss SARSRI** Professeur Habilité à L'ENSA de Tanger, à qui j'exprime toute ma gratitude d'avoir su instaurer entre nous un climat d'amitié, et ma profonde reconnaissance pour sa grande disponibilité, ses conseils judicieux et ses encouragements dans les moments difficiles.

En France, la co-direction de cette thèse a été assurée par Madame **Mihaela BARREAU**, co-encadré par Monsieur **Laurent Saintis**. Merci infiniment de m'avoir fait confiance, de votre patience, de vos remarques et de votre implication matérielle et morale. Merci à vous les deux de m'avoir assuré un climat de sérénité et d'amitié, ce qui a rendu mes séjours au LARIS très agréables, très fructueux et plus nombreux.

Je suis très reconnaissant envers Monsieur **Abdessamad KOBI**, Professeur des Universités au Polytech Angers d'avoir initié cette coopération, également de m'avoir fait l'honneur d'examiner mon travail et d'être membre de jury de ma thèse.

Je tiens également à remercier et manifester ma profonde gratitude à Messieurs **Adelkhalak ELHAMI**, **RADI Bouchaib** et **BOUMANE Abderrazzak**, Professeurs des universités respectivement à l'INSA de Rouen, FST de Settat et l'ENSA de Tanger, pour avoir accepté d'étudier mes travaux avec beaucoup d'intérêt et d'en être les rapporteurs et de faire partie du jury de soutenance.

Mes remerciements s'adressent à Monsieur **SBIHI Abderrahmane**, Professeur d'enseignements supérieurs à L'ENSA de Tanger, d'avoir fait l'honneur de présider mon jury de soutenance.

Je remercie chaleureusement et sans mesure **Mes parents**, mes sœurs **Chaimae et Hanane**, et mes frères: **Mohamed et Soulaiman**, pour leur soutien permanent et indéfectible, grâce à qui j'ai pu en arriver jusque là.

Enfin, Je tiens à remercier les amis du labo LTI à Tanger: **Abdessamad, Zakaria, Foad**,...également mes amis: **Nadare, Khaoula, Aiwan**...de l'équipe SFD au Labo LARIS, ainsi que les amis à Angers: **Hamza, Omar, Yassin**,... Merci pour les moments agréables que l'on a partagés durant ces quatre ans.

Résumé

L'étude de la fiabilité des systèmes mécatroniques est un axe de recherche relativement récent. Ces études doivent être menées au plus tôt au cours de la phase de conception, afin de prévoir, modéliser et concevoir des systèmes fiables, disponibles et sûrs et de réduire les coûts et le nombre de prototypes nécessaires à la validation d'un système. Après avoir défini les systèmes mécatroniques et les notions de sûreté de fonctionnement et de fiabilité, nous présentons un aperçu des approches existantes (quantitatives et qualitatives) pour la modélisation et l'évaluation de la fiabilité, et nous mettons en évidence les points d'amélioration et les pistes à développer par la suite. Les principales difficultés dans les études de fiabilité des systèmes mécatroniques sont la combinaison multi-domaines (mécanique, électronique, informatique) et les différents aspects fonctionnels et dysfonctionnels (hybride, dynamique, reconfigurable et interactif). Il devient nécessaire d'utiliser de nouvelles approches pour l'estimation de la fiabilité. Nous proposons une méthodologie d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle en phase de conception d'un système mécatronique, en prenant en compte les interactions multi-domaines entre les composants, à l'aide de la modélisation par Réseaux de Pétri, Réseaux bayésiens et fonctions de croyance. L'évaluation de la fiabilité en phase de développement doit être robuste, avec une confiance suffisante et prendre en compte tant les incertitudes épistémiques concernant les variables aléatoires d'entrée du modèle utilisé que l'incertitude sur le modèle pris en hypothèse. L'approche proposée a été appliquée à l'«actionneur intelligent» de la société Pack'Aero.

Abstract

Reliability analysis of mechatronic systems is one of the most dynamic fields of research. This analysis must be conducted during the design phase, in order to model and to design safe and reliable systems. After presenting some concepts of mechatronic systems and of dependability and reliability, we present an overview of existing approaches (quantitatives and qualitatives) for the reliability assessment and we highlight the perspectives to develop. The criticality of mechatronic systems is due, on one hand, to multi-domain combination (mechanical, electronic, software), and, on the other hand, to their different functional and dysfunctional aspects (hybrid, dynamic, reconfigurable and interactive). Therefore, new approaches for dependability assessment should be developed. We propose a methodology for reliability assessment in the design phase of a mechatronic system, by taking into account multi-domain interactions and by using modeling tools such as Petri Nets and Dynamic Bayesian Networks. Our approach also takes into account epistemic uncertainties (uncertainties of model and of parameters) by using an evidential network adapted to our model. Our methodology was applied to the reliability assessment of an "intelligent actuator" from Pack'Aero.

Contents

1	Introduction Générale	19
1.1	Contexte	19
1.2	Objectif	20
1.3	Structure du manuscrit	21
2	Notions sur les systèmes mécatroniques et la sûreté de fonctionnement	23
2.1	Introduction	23
2.2	Les systèmes mécatroniques	24
2.2.1	Historique et définitions	24
2.2.2	Architecture des systèmes mécatroniques	25
2.2.3	Domaines d'application	26
2.2.4	Le cycle de développement mécatronique	26
2.3	Exemples des systèmes mécatroniques	28
2.3.1	Cœur artificiel CARMAT	28
2.3.2	l'Active Wheel® de Michelin	30
2.3.3	Système de commandes de vol fly by wire d'Airbus	30
2.4	Notions de Sûreté de Fonctionnement	32
2.4.1	Définitions	32
2.4.2	La fiabilité	32
2.4.3	La disponibilité	32
2.4.4	La maintenabilité	32
2.4.5	La sécurité	33
2.4.6	Durées fondamentales en sûreté de fonctionnement	33
2.5	Fonction de fiabilité	34
2.5.1	Définition	34
2.5.2	Les phases de fiabilité	35
2.5.3	Définition d'une défaillance	37
2.5.4	Taux de défaillance	37
2.6	Les principales lois de fiabilité	38
2.6.1	Loi exponentielle	38
2.6.2	Loi de Weibull	39
2.6.3	Loi normale	39

2.6.4	Loi uniforme	39
2.6.5	Loi Bêta	40
2.6.6	Autres lois	40
2.7	Conclusion	41
3	État de l'art des méthodes d'évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques	43
3.1	Sûreté de Fonctionnement des systèmes mécatroniques	43
3.2	Fiabilité prévisionnelle d'un système mécatronique	44
3.3	Étude de fiabilité selon la nature du système	45
3.3.1	Fiabilité des systèmes dynamiques	45
3.3.2	Fiabilité des systèmes hybrides	46
3.3.3	Fiabilité des systèmes avec interactions multi-domaines	46
3.3.4	Fiabilité des systèmes reconfigurables	47
3.4	Études de fiabilité pour les différentes technologies	48
3.4.1	Fiabilité Mécanique	48
3.4.2	Fiabilité Électronique/Électrique	50
3.4.3	Fiabilité logicielle	51
3.4.4	Fiabilité de système de contrôle	52
3.5	Travaux d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle d'un système mécatronique	53
3.5.1	Approche de fiabilité mécatronique par l'AMDEC et les AdD	53
3.5.2	Approche par Réseaux de Petri pour la fiabilité mécatronique	54
3.5.3	Fiabilité mécatronique à l'aide de la matrice sémantique	58
3.5.4	L'outil flux informationnel pour la fiabilité mécatronique	59
3.5.5	Méthode holistique d'analyse de la fiabilité mécatronique	61
3.5.6	Propagation de défaillance dans un système mécatronique	61
3.5.7	Approche par Réseau Bayésien de la fiabilité mécatronique	62
3.5.8	Modèle de Cox pour la prédiction de la fiabilité mécatronique	63
3.5.9	Utilisation des Bond Graph et de l'AMDEC pour l'évaluation de la fiabilité	64
3.5.10	Démarche d'évaluation de la fiabilité d'un système mécatronique interactif	65
3.6	Synthèse	66
3.7	Conclusion	68
4	Évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques avec la prise en compte des interactions multi-domaines	69
4.1	Introduction	69
4.2	Problématique de l'interaction multi-domaines	70
4.3	Méthodologie proposée	71
4.4	Modélisation qualitative	72
4.4.1	Analyse fonctionnelle	72
4.4.2	Analyse dysfonctionnelle	72
4.5	Modélisation par les réseaux Bayésiens	74

4.5.1	Définition des réseaux Bayésiens	74
4.5.2	Réseau Bayésien Dynamique	76
4.5.3	Modélisation de la fiabilité par les réseaux bayésiens dynamiques	77
4.5.4	Exemple de réseau Bayésien sous "Hugin"	78
4.6	Modélisation quantitative par Réseaux de Petri	79
4.6.1	Définition des RdP	79
4.6.2	Extensions des Réseaux de Petri	80
4.6.3	Modélisation de la fiabilité par Réseaux de Petri	81
4.7	Modélisation des interactions multi-domaines	83
4.7.1	Modélisation qualitative	83
4.7.2	Modélisation quantitative	84
4.7.3	Lois associées aux facteurs d'influence	85
4.7.4	Loi d'Arrhenius	86
4.7.5	Loi de Peck	87
4.7.6	Loi puissance inverse	87
4.7.7	Loi de Cox	88
4.7.8	Réseau Bayésien dynamique de fiabilité	89
4.8	Application à l'actionneur intelligent «Voice Coil»	92
4.8.1	Présentation du système	92
4.8.2	Modélisation qualitative du l'actionneur intelligent	93
4.8.3	Fiabilité de l'actionneur par BDF	96
4.8.4	Fiabilité de l'actionneur sans interaction domaine par réseaux Bayésiens	98
4.8.5	Fiabilité de l'actionneur par réseaux de Petri (RdP)	100
4.8.6	Modélisation RBD de l'interaction multi-domaines palier/bobine	101
4.9	Comparaison des fiabilités obtenues avec et sans prise en compte de l'interaction palier/bobine	103
4.9.1	Modèle RdP de Fiabilité pour l'interaction palier/bobine	104
4.9.2	Échauffement de la bobine	104
4.10	Conclusion	108
5	Prise en compte des incertitudes épistémiques lors d'évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques	109
5.1	Introduction	109
5.2	Contexte et Problématique	110
5.3	Les types d'incertitudes	111
5.3.1	Incertaines aléatoires	111
5.3.2	Incertaines épistémiques	112
5.4	Réseaux de croyance	113
5.4.1	Introduction aux fonctions de croyance	113
5.4.2	Définitions : Fonctions de croyance	114
5.4.3	Obtention d'une fonction de croyance	116
5.4.4	État de l'art : Fonctions de croyance en fiabilité	117

5.5	L'approche globale d'évaluation de la fiabilité mécatronique incertaine	119
5.6	Réseaux de fonctions de croyance en fiabilité	120
5.6.1	Projection des fonctions de croyance en fiabilité	120
5.6.2	Réseau de Pétri Crédibilise	121
5.6.3	Élaboration des réseaux de croyances bayesiens	123
5.6.4	Incertitude liée aux interactions multi-domaines	125
5.7	Application sur l'actionneur intelligent	126
5.7.1	Réseau de croyance pour l'actionneur avec et sans prise en compte de l'interaction	129
5.7.2	Résultats	130
5.8	Conclusion	132
6	Conclusion Générale	133
6.1	Résumé des contributions	133
6.2	Perspectives	135
7	Annexes	151
7.1	Programme BNT de la fiabilité sans la prise en compte de l'interaction multi-domaine	151
7.2	Programme BNT de la fiabilité avec la prise en compte de l'interaction multi-domaine	154
7.3	Programme BNT de la fiabilité avec incertitude et sans interaction multi-domaine	157
7.4	Programme BNT de la fiabilité avec incertitude et l'interaction multi-domaine	160
7.5	Fiche Technique de l'actionneur Pack'aero	162
7.6	Données du retour d'expériences (REX)	164
7.7	Recueils de données de fiabilité électronique	165
7.8	Données de fiabilité pour des composants mécaniques	167
7.9	First and Second Order Reliability Method (FORM et SORM)	168
7.9.1	Notion d'indice de fiabilité	168
7.9.2	Indice de Cornell	169
7.9.3	Indice de fiabilité du premier ordre β_{F0}	169
7.9.4	Indice de Hasofer-Lind β_{HL}	170
7.9.5	Indice de Fiabilité Généralisé	170
7.10	Approche probabiliste de "Contrainte-Résistance"	171
7.10.1	Étapes de la méthode	171
7.10.2	Analyse mécanique	172
7.11	Simulation Monte Carlo	174

List of Tables

2.1	Critères associé aux niveaux DAL	38
2.2	Utilisation des lois de probabilité	40
3.1	Matrice sémantique selon les technologies	59
3.2	Matrice sémantique selon les critères	59
3.3	Synthèse des travaux sur l'évaluation de la fiabilité mécatronique selon les aspects	66
3.4	Synthèse des modèles dans les travaux de fiabilité mécatronique	67
4.1	Table des probabilités a priori du nœud source X_1	76
4.2	Table de probabilités conditionnelles de noeud X_3	76
4.3	Table de probabilités des composants A, B et C	78
4.4	Les interactions multi-domaines dans un système mécatronique	84
4.5	Lois associées aux interactions multi-domaines	85
4.6	TCP de noeud X_{t+1} influencé par l'interaction	91
4.7	TCP de noeud X_{t+1} non influencé par l'interaction	91
4.8	Cahier de charge fonctionnel de l'actionneur Intelligent	94
4.9	Taux de défaillance des composants de l'actionneur	96
4.10	TPC des éléments non influencés par l'interaction	99
4.11	Table de probabilités conditionnelles de la bobine	102
4.12	Comparaison des résultats obtenus pour la fiabilité dans les deux cas	103
5.1	Table de masses de croyance : Porte ET	123
5.2	Table de masses de croyance : Porte OU	123
5.3	Incertitudes du taux défaillance liées à l'interaction multi-domaines	125
5.4	Table des masses de croyance du composant influencé	126
5.5	Taux de défaillance min-max des composants	126
5.6	Fonction de croyance pour des systèmes S/P	127
5.7	Table des masses conditionnelles du système	129
5.8	Table de masses conditionnelles de BEL	130
5.9	Table de masses conditionnelles de PL	130
5.10	Table des masses conditionnelles de la bobine	130
5.11	Comparaison de la fiabilité du système à $t = 5000$ h pour les deux cas	131

7.1	Table de Base de données de la fiabilité électronique	165
7.2	Bases de données de la fiabilité électronique-Électrique	166
7.3	Bases de données de fiabilité mécanique	167

List of Figures

2.1	Synergie de différents domaines en mécatronique	24
2.2	Architecture des systèmes mécatroniques	25
2.3	Domaines d'application des systèmes mécatroniques	26
2.4	Complexité d'une structure mécatronique	27
2.5	Cycle en V d'un produit mécatronique	28
2.6	Cœur artificiel CARMAT	29
2.7	Active Wheel de Michelin	30
2.8	Système fly by wire d'Airbus	31
2.9	Sûreté de fonctionnement (SDF) [Villemeur, 1992]	32
2.10	Relations entre les éléments de Sûreté de fonctionnement [Villemeur, 1992]	34
2.11	Durées fondamentales en sûreté de fonctionnement	34
2.12	Courbe de survie ou de fiabilité	35
2.13	Phases de fiabilité d'un système selon le cycle en V	36
2.14	Courbe baignoire de taux de défaillance	37
3.1	Les axes relatifs à la fiabilité prévisionnelle d'un système mécatronique	45
3.2	Diagramme de Methode Form	49
3.3	Approche AdD pour la fiabilité d'un système mécatronique [Kopp et al., 2011]	53
3.4	Application de l'Arbre de défaillance de lève vitre de voiture	53
3.5	Démarche de fiabilité Prévisionnelle d'un système mécatronique par RdP	55
3.6	Modèle RdP du système ESP [Barreau et al., 2003]	56
3.7	Modèle RdP du système ABS (a):[Demri, 2009a] et (b):[Mihalache, 2007]	57
3.8	Modèle RdP d'un système photovoltaïque [Laronde et al., 2010]	57
3.9	Matrice sémantique pour la fiabilité prévisionnelle d'un système mécatronique	58
3.10	Démarche fiabiliste par l'approche flux informationnel	60
3.11	Exemple de modèle haut/bas niveau [Belhadaoui et al., 2007]	60
3.12	Les interactions multi-domaines d'un système mécatronique	61
3.13	Modèle SysML d'un connecteur physique "tube"	62
3.14	Modèle Réseau Bayésien du système de suspension	63
3.15	Modèle de Cox pour la fiabilité mécatronique	64
3.16	Modèle Bond Graph de la commande du système de freinage des pales d'éolienne	64
3.17	Méthodologie d'estimation de la fiabilité d'un système mécatronique avec M-interaction	65

4.1	Méthodologie pour évaluer la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques	71
4.2	Exemple d'AMDEC	73
4.3	Exemple de réseau Bayésien	75
4.4	Exemple de réseau bayésien dynamique	77
4.5	Schéma d'un système de trois composants	78
4.6	Modèle dysfonctionnel RB d'un système de trois composants	79
4.7	Exemple de réseau de Petri	80
4.8	Modèle RdP de défaillance d'un composant réparable	82
4.9	Présentation graphique des interactions multi-domaines	83
4.10	Modèle proposé pour les interactions	84
4.11	Les facteurs d'influence	85
4.12	Modèle RBD de défaillance d'un composant	89
4.13	Modèle de réseau Bayésien de l'interaction multi domain	90
4.14	Modèle RdP de l'interaction mult-domaine	91
4.15	Présentation du système Actionneur Intelligent	92
4.16	Diagramme pieuvre de l'actionneur intelligent	93
4.17	Diagramme FAST de l'actionneur intelligent	95
4.18	AMDEC de la bobine électrique de l'actionneur	96
4.19	Diagramme de fiabilité de l'actionneur intelligent	97
4.20	Courbe de fiabilité de l'actionneur intelligent par diagramme de fiabilité	97
4.21	Réseau Bayésien dynamique du l'actionneur intelligent	98
4.22	TPC du nœud système, en pourcentage	98
4.23	Courbe de fiabilité du système et de ses composants, sans prise en compte d'interaction multi-domaines	99
4.24	Modèle RdP de l'actionneur, sans prise en compte d'interactions	100
4.25	Fiabilité de l'actionneur intelligent sans prise en compte d'interaction	100
4.26	Modèle de dégradation du Palier	101
4.27	Modèle RBD de l'actionneur avec prise en compte de l'interaction palier/bobine	103
4.28	Courbes de fiabilité du système et de ses composants avec prise en compte de l'interaction Palier-Bobine	104
4.29	Modèle RBD de l'actionneur sous BNT	105
4.30	Fiabilité de l'Actionneur intelligent Sans/Avec prise en compte d'interaction	105
4.31	Modèle RdP de l'actionneur avec l'interaction multi-domaines	106
4.32	L'évolution de la température de la bobine	106
4.33	Graphe d'évolution de taux de défaillance de la bobine	106
4.34	Courbes de fiabilité des composantes du système avec la prise en compte des interactions	107
5.1	Types d'incertitudes[Duy and Duong, 2011]	111
5.2	Limites entre les fonctions de croyances	116
5.3	Exemples des fonctions de croyances	117
5.4	Méthodologie globale d'évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques	119

5.5	Réseau de Petri à fonctions de croyance proposé	121
5.6	Exemple d'un système en série	122
5.7	Réseaux de croyances	122
5.8	Exemple de réseaux de croyances	123
5.9	L'inférence dans les réseaux de croyances	124
5.10	Approche pour intégrer les incertitudes épistémiques et les interactions multi-domaines	125
5.11	Modèle Rdp de l'actionneur avec incertitudes des paramètres	127
5.12	Fonctions PI and Bel de l'actionneur sans interaction	128
5.13	Réseau de croyance Bayésien dynamique de l'actionneur	129
5.14	Réseau de croyance l'actionneur avec interaction sous BNT	131
5.15	Valeur de PI et Bel de la bobine électrique et le système	131
5.16	Comparaison des fonctions PI et Bel de fiabilité	132
7.1	Méthode FORM/SORM pour la fiabilité des systèmes	168
7.2	Aléas internes et externes d'une structure mécanique	172
7.3	Cas élémentaire de Fonction d'état d'une structure.	173
7.4	Exemple de la Méthode de Monté Carlo	174

Introduction Générale

1.1 Contexte

Combinaison de la mécanique, de l'électrotechnique, du logiciel et de l'électronique, la mécatronique peut être considérée comme une révolution pour le milieu industriel et un défi technologique à relever. La mécatronique est présente dans tous les grands secteurs de l'industrie : transports, biens de consommation, biens d'équipement, les robots, les véhicules autonomes etc. L'apparition des systèmes mécatroniques vise à répondre aux nouvelles exigences du marché, en termes de performance, de confort, de robustesse, de fiabilité, de sécurité et de consommation d'énergie, en produisant à des coûts et en un temps optimal. Dans un contexte de concurrence exacerbée entre les entreprises, la fiabilité des systèmes mécatroniques est devenue un facteur de compétitivité.

L'étude de la fiabilité des systèmes mécatroniques est un domaine relativement jeune. La fiabilité correspond à la confiance, dans le temps, qu'un utilisateur peut accorder à un équipement. Actuellement, elle intervient tout au long du cycle de vie du produit ou du système (conception, fabrication, exploitation). Elle est un facteur d'aide à la décision vis-à-vis des enjeux économiques, c'est l'une des valeurs ajoutées des systèmes mécatroniques. L'approche mécatronique de la fiabilité vient de la problématique posée par la décomposition du cycle de vie d'un système en phases consécutives, tout en découpant le système en sous-systèmes étudiés indépendamment (mécanique, électronique, informatiques, etc.). Cette approche nécessite de définir une méthodologie d'évaluation pluri-technologique optimale.

Un système pluridisciplinaire lors de la conception suit une approche simultanée, avec des spécifications différentes en termes de méthodes et modèles. Cela rend la fusion de l'ensemble dans un modèle fiabiliste d'un système mécatronique complexe. La présente étude apporte des améliorations méthodologiques qui permettent de résoudre plusieurs verrous scientifiques lors des études d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques, études réalisées dès la phase de conception. La bibliographie montre que les systèmes mécatroniques sont des systèmes complexes et pluri-technologies caractérisés par des as-

pects hybrides, dynamiques, interactifs et reconfigurables. Toutes ces caractéristiques doivent être prises en compte lors du développement d'une méthodologie afin d'assurer une bonne maîtrise de la fiabilité de ces systèmes. Plusieurs études ont été ainsi réalisées pour évaluer la fiabilité prévisionnelle d'un système en prenant en compte ces aspects. En outre, un des objectifs de la fiabilité des systèmes mécatroniques est d'estimer, à partir d'une incertitude sur l'état de fonctionnement des composants, l'incertitude globale concernant l'état de fonctionnement du système entier, d'où l'importance d'intégrer l'étude des incertitudes des paramètres et de modèles lors de l'évaluation de la fiabilité.

1.2 Objectif

Ce mémoire de thèse présente les travaux réalisés dans le cadre d'une convention de thèse en co-tutelle internationale, entre le laboratoire LARIS de l'université d'Angers, France et le laboratoire LTI-ENSA de Tanger, Maroc. Ces travaux ont permis de développer une méthodologie pour l'évaluation de la fiabilité prévisionnelle d'un système mécatronique en phase de conception.

L'objectif de cette étude est de fournir un modèle d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle qui prend en compte les interactions multi-domaines entre les composants et l'estimation des incertitudes, à la fois des variables d'entrée (paramètres) et du modèle. Cette étude est réalisée pendant les phases de spécification et de conception du système, afin de garantir le comportement fonctionnel du système dans la suite de son développement (de la spécification jusqu'à la validation et à la mise en exploitation), et pour concevoir des systèmes mécatroniques plus fiables, dans lesquels les utilisateurs placent une grande confiance.

Pour atteindre les objectifs de fiabilité exigée, il est devenu primordial de trouver une méthodologie globale qui prend en considération les différents aspects : hybride, dynamique, reconfigurable, ainsi que l'existence des interactions multi-domaine. Il s'agit de construire un nouveau modèle pour l'évaluation de la fiabilité qui prend en compte des données d'essais de développement du système et les données d'essais des composants, soit à l'aide de l'avis des experts sur les composants, soit à partir des bases des données existantes.

Ces ressources sont insuffisantes pour valider avec précision les taux de défaillances ou les lois de probabilités de défaillances, il est souvent difficile d'extraire une loi de probabilité pour représenter les incertitudes épistémiques. Les fiabilistes choisissent arbitrairement une des lois de probabilité de défaillance (normale, weibull, etc), ce qui peut introduire des erreurs dans les résultats. L'idéal est de disposer d'une quantité d'information suffisante concernant les défaillances des composants pour pouvoir estimer avec précision leurs taux de défaillance.

L'estimation de la fiabilité en phase de développement doit être robuste et avec une confiance suffisante. Cette estimation doit également prendre en compte les incertitudes concernant les variables aléatoires d'entrée du modèle utilisé et l'incertitude sur le modèle d'estimation pris en hypothèse.

Le fiabiliste mécatronicien est confronté aux problématiques suivantes :

- Modéliser les interactions-multi domaines entre les composants.
- Simuler le dysfonctionnement d'un système pluri-technologiques.

- Évaluer la fiabilité prévisionnelle prenant en compte les incertitudes à la fois du modèle et de ses variables d'entrée.
- Choisir le modèle de représentation des dysfonctionnements le plus pertinent (Chaînes de Markov, Réseaux de Pétri, Réseaux Bayésiens, Fonctions de Croyance, etc.).

1.3 Structure du manuscrit

Notre travail est structuré dans un document comprenant quatre chapitres.

Dans une première partie, le premier chapitre décrit les caractéristiques des systèmes mécatroniques, leurs domaines d'application, ainsi que des exemples industriels réels (Cœur artificiel CARMAT, l'Active Wheel de Michelin, la commande de vol fly by wire d'Airbus). Dans une seconde partie, des généralités sur la sûreté de fonctionnement sont abordées, les différentes lois de fiabilité sont introduites selon la phase de développement du système (fiabilité prévisionnelle, fiabilité expérimentale, fiabilité opérationnelle).

Dans le deuxième chapitre, nous avons réalisé un état de l'art des travaux relatifs à la problématique de la fiabilité des systèmes mécatroniques, concept qui recouvre les méthodes et modèles d'évaluation dans un contexte dynamique hybride interactif et reconfigurable ainsi que dans un contexte fiabiliste pluri-technologique (Mécanique, Électronique, Informatique et Contrôle). Ce travail correspond à la première année de notre travail qui a exigé de notre part une importante contribution. Cet état de l'art nous a permis d'avoir une vision générale sur ce domaine, de faire une analyse critique des différents modèles, analyse à partir de laquelle des voies de recherche ont été proposées.

Le premier point mentionné dans les perspectives des récents travaux en bibliographie est le traitement des interactions multi-domaines, nous proposons dans le troisième chapitre une approche permettant la prise en compte quantitative des interactions multi-domaines lors de l'évaluation de fiabilité des systèmes mécatroniques. La première partie explique le principe de la démarche que nous avons mise en place, tant sur le plan qualitatif que quantitatif. Ensuite, l'approche est appliquée à l'aide de deux modèles : les Réseaux de Pétri (RdP) et les Réseaux Bayésiens Dynamiques (RBD). Pour illustrer la faisabilité de la démarche proposée, nous l'avons testée sur une application industrielle. Il s'agit d'un actionneur intelligent de la société PAK'AERO. Cette application est présentée dans la troisième partie.

Le dernier chapitre est dédié au traitement des incertitudes épistémiques (incertitudes de modèle et des paramètres) y compris les interactions multi-domaines. Ce chapitre est décomposé en deux parties : la première présente des notions sur les incertitudes épistémiques et les fonctions de croyances ainsi que leurs conséquences dans le domaine de la fiabilité. Dans la deuxième partie, nous proposons l'adaptation des réseaux de croyance établis par l'intégration des Réseaux Bayésiens Dynamiques (RBD) et des fonctions de croyance (FC) afin de traiter de l'interaction multi-domaines avec incertitudes.

La dernière partie concerne la validation de la démarche, par l'application sur le système "actionneur intelligent", en réutilisant les données d'incertitude sur les paramètres.

Notions sur les systèmes mécatroniques et la sûreté de fonctionnement

2.1 Introduction

Les dispositifs mécatroniques sont utilisés dans tous les secteurs industriels et dans de nombreuses applications telles que la santé, l'environnement, l'énergie ou le domaine spatial afin de piloter les systèmes et s'adapter aux conditions variables de fonctionnement. Ils sont apparus afin de répondre aux nouvelles exigences en termes de performance, de confort, de fiabilité, de sécurité et de consommation d'énergie. Néanmoins, ces systèmes sont particulièrement difficiles à concevoir, étant donné qu'ils requièrent des connaissances dans toutes les disciplines concernées. Cette conception demeure un vrai défi malgré l'apparition de nouvelles méthodes. Cela conduit à envisager des solutions innovantes dans différentes disciplines (la mécanique, l'électronique, le logiciel) pour optimiser les fonctions du système.

La fiabilité des systèmes mécatroniques est devenue un sujet d'étude très actuel. C'est un domaine relativement jeune tiré par la technologie et les besoins du marché. Du principe, l'objectif de la mécatronique est d'exploiter au maximum le couplage multi-domaine pour offrir des performances techniques et économiques toujours plus élevées [Isermann, 2008]. L'augmentation des niveaux de couplages entraîne inéluctablement une explosion de la complexité de systèmes, de leur contrôle, et des processus de conception et fabrication. Cette complexité du processus influe sur la conception de ce système et devient un défi majeur pour la Sûreté de Fonctionnement, et plus précisément pour les études de fiabilité. L'intérêt de de la SdF est de concevoir des systèmes complexes puissants, plus fiables et sûrs de fonctionnement, adaptables aux différents environnements. A cette fin, de nombreuses recherches [Ziegler, 1996], [Moncelet et al., 1998b], [Khalfaoui, 2003], [Medjoudj, 2006] [Demmou et al., 2004], [Abdelkhalak and Bouchaïb, 2013], [Barreau et al., 2006], [Schoenig et al., 2006], [Turki, 2008], [Belhadaoui, 2011] [Sharma and Sharma, 2015], ont déjà été réalisées pour voir répondre à cet enjeu, en respectant la norme ISO 26262 [Bishop, 2002]. Dans cette partie,

nous détaillons les méthodologies établies dans la bibliographie, afin d'évaluer la fiabilité d'un système mécatronique.

Les résultats des études bibliographiques sont décrits en précisant, d'une part, les objectifs des travaux et du contexte scientifique et, d'autre part, en mettant en évidence les points faibles.

2.2 Les systèmes mécatroniques

2.2.1 Historique et définitions

Avant les années 50, les machines sont essentiellement des ensembles électromécaniques. Avec l'apparition des semi-conducteurs, les systèmes électroniques de puissance et de commande sont développés. Dans les années 60-70, l'apparition des calculateurs a permis de concevoir des systèmes de contrôle pour les machines industrielles. Ces calculateurs programmables deviennent plus fiables, plus flexibles et plus performants, conduisant à l'apparition des systèmes mécatroniques.

La mécatronique est la fusion et l'intégration en évolution permanente en vue d'enrichir un système mécanique par un ensemble de fonctionnalités apportées par les autres domaines de la science et de la technologie. [Jardin, 2010] Fusion et intégration signifient qu'il s'agit d'associer des composants électroniques dans les systèmes mécaniques, d'associer des disciplines (ingénierie mécanique et ingénierie électronique) et d'associer des processus (conception et fabrication) pour aboutir au sens actuel associant une méthodologie et une démarche d'ingénierie (le mot mécatronique) et description technique/fonctionnelle d'un système. Le terme « mechatronics » a été introduit par un ingénieur de la compagnie japonaise « Yaskawa » en 1969. Le terme mécatronique est apparu officiellement en France dans le Larousse 2005 selon la norme NF E 01-010, la mécatronique est 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 » (figure 2.1).

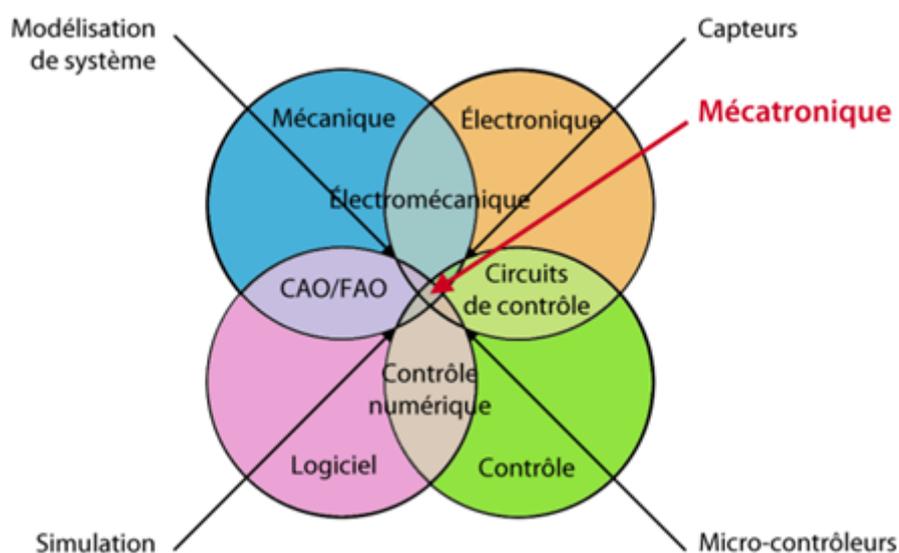


Figure 2.1: Synergie de différents domaines en mécatronique

Le journal international IEEE/ASME Transactions on Mechatronics [Onwubolu, 2005] définit la mé-

catronique ainsi : “mechatronics is the synergetic combination of mechanical engineering with electronics and intelligent computer control in the design and manufacturing of industrial products and processes”. Un système mécatronique est caractérisé par l’intégration et l’interaction des différents domaines physiques et technologiques tels que :

- Systèmes mécaniques (éléments mécaniques, machines, mécanique de précision),
- Systèmes électroniques (micro-électronique, électronique de puissance, capteurs et actionneurs),
- Technologie de l’information (automatisation, génie logiciel, intelligence artificielle).

La mécatronique est une approche nouvelle de l’ingénierie de conception. Si l’essor de la mécatronique aujourd’hui est rendu possible grâce aux progrès scientifiques et technologiques dans des domaines très spécialisés, cette approche multidisciplinaire de conception nécessite un dialogue permanent entre les spécialistes, dès l’établissement du cahier des charges, dans le but de l’intégration des fonctions intelligentes dans les produits, comme l’optimisation de la consommation énergétique, une meilleure intégration dans l’environnement ou une réactivité accrue par rapport aux phénomènes extérieurs. La démarche de conception d’un système mécatronique est une déclinaison de l’ingénierie des systèmes avec ses spécificités. L’approche mécatronique nécessite d’une part, de replacer la conception du produit dans son cycle de vie global et, d’autre part, de mettre en œuvre simultanément une collaboration interdisciplinaire, utilisant une démarche commune d’intégration. La spécificité de la conception de produits mécatroniques réside dans les différents niveaux d’intégration à mettre en œuvre : intégration fonctionnelle, multi-domaine et physique, pour obtenir un produit avec une plus haute valeur ajoutée.

2.2.2 Architecture des systèmes mécatroniques

Malgré la grande diversité de domaines concernés et de déclinaisons applicatives, il est possible de synthétiser de manière générique la description de l’architecture d’un système mécatronique (figure 2.2).

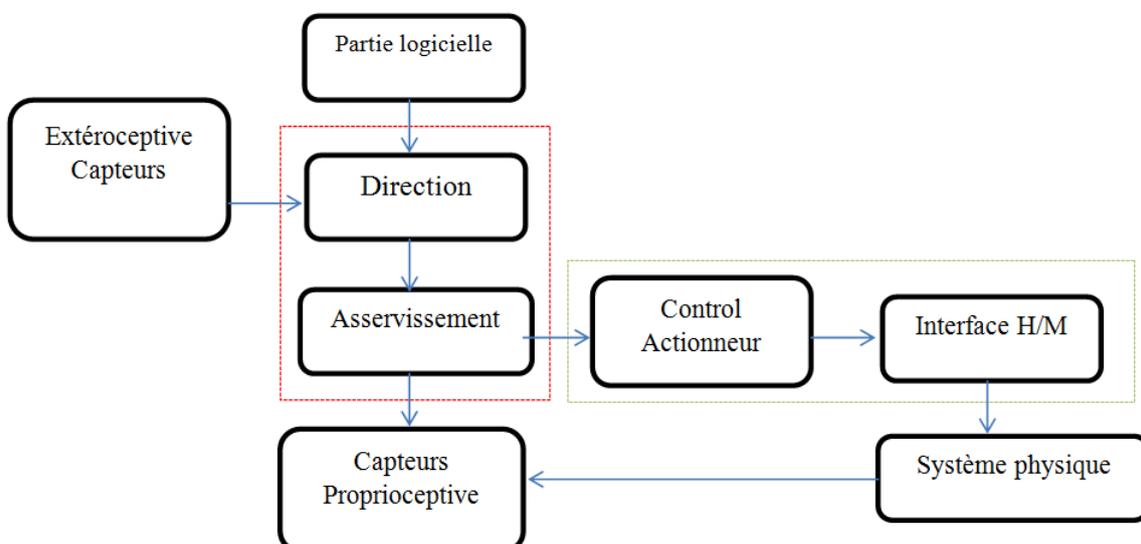


Figure 2.2: Architecture des systèmes mécatroniques

Un système mécatronique peut être vu comme des chaînes d'actionneurs supervisées par des algorithmes de commande, potentiellement pilotés par une IHM (Interface Homme-Machine). La chaîne d'actionnement représente la partie opérative du système piloté, ce dernier étant constitué de l'ensemble chaîne d'actionnement + électronique de commande + informatique.

2.2.3 Domaines d'application

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. La figure 2.3 présente un aperçu des applications des systèmes mécatroniques dans différents domaines tels que le transport, le médical, la recherche spatiale ou la fabrication [Turki, 2008].

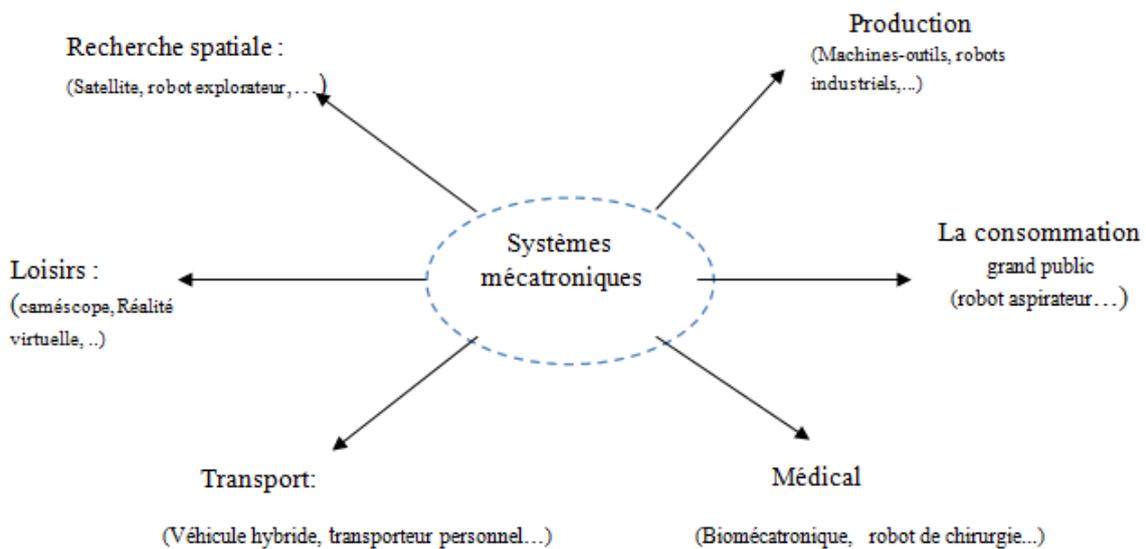


Figure 2.3: Domaines d'application des systèmes mécatroniques

2.2.4 Le cycle de développement mécatronique

La conception classique des systèmes complexes est effectuée par une stratégie qui peut être divisée en deux étapes [Penas et al., 2011]:

- La première partie concerne la décomposition séquentielle du cycle de vie du produit (conception, processus de fabrication, distribution du produit, maintenance du produit...).
- La deuxième partie concerne le découpage du produit en sous-systèmes « métier » (mécanismes, motorisation, capteurs, énergie, commande...).

Les systèmes mécatroniques que l'on conçoit sont de plus en plus complexes (figure 2.4). Cette démarche n'est alors plus compatible avec ce qu'imposent les marchés actuels (qualité accrue, coût réduit, délais de conception et de fabrication réduits, miniaturisation et intégration, maintenance plus aisée, recyclage, mondialisation des marchés, etc.) [Lebrun, 2003], d'où le besoin d'une nouvelle démarche de

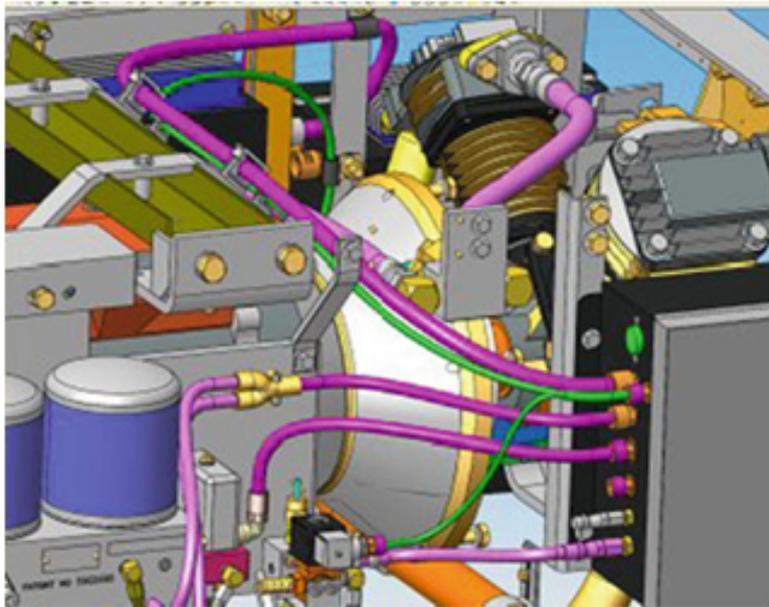


Figure 2.4: Complexité d'une structure mécatronique

conception « mécatronique » des systèmes complexes permettant une optimisation du produit. Cette nouvelle démarche de modélisation doit assurer le passage d'une conception des composants séparés à un système mécatronique fusionné. La conception d'un système mécatronique est une démarche itérative constituée d'allers retours entre la définition fonctionnelle du produit (besoin et exigences du client) et sa définition multi-physique. Cette conception se présente sous la forme d'un cycle en V. Le cycle de conception en V proposé s'appuie sur les travaux de [Lebrun, 2003] et de [Isermann, 2008], [Jardin, 2010], [Penas et al., 2011].

Ce cycle (figure 2.5) est constitué de deux branches: la branche descendante correspond aux différentes phases de spécification et de conception, tandis que la branche ascendante correspond à des tâches d'intégration et de validation des travaux de conception par étape. Ainsi, chaque étape ne peut être réalisée que si l'étape précédente est terminée, ce qui améliore la conception et diminue les risques de défaillance. On parle alors d'ingénierie concourante (ou encore d'approche système), où la démarche de conception intègre dès le départ l'interconnexion des différentes disciplines associées à des domaines physiques et/ou à des sous-systèmes, par opposition à des démarches plus anciennes d'ingénierie séquentielle (ou approche métier), cloisonnée par discipline et/ou sous-système.

Les phases d'étude, de conception et de développement sont suivies d'une démarche caractérisant l'intégration, les tests et la validation du système. Cette démarche couvre le cycle de vie d'un produit, depuis les spécifications jusqu'à la production (voire jusqu'à la fin de vie du produit avec la prise en compte de l'impact environnemental). La conception implique un parcours du cycle de manière récursive, par itérations successives, avec des phases de ré-conception si nécessaire lors des études de conformité. Il est important de noter que la démarche de conception des systèmes mécatroniques associe deux cycles en parallèle, relatifs à la partie opérative (chaîne d'actionnement) et à la commande (partie pilotage de la chaîne d'actionnement) du système, conformément au principe de l'ingénierie concourante [Isermann, 2008].

La réduction des coûts et de temps de mise sur le marché des produits tout en améliorant leur qualité

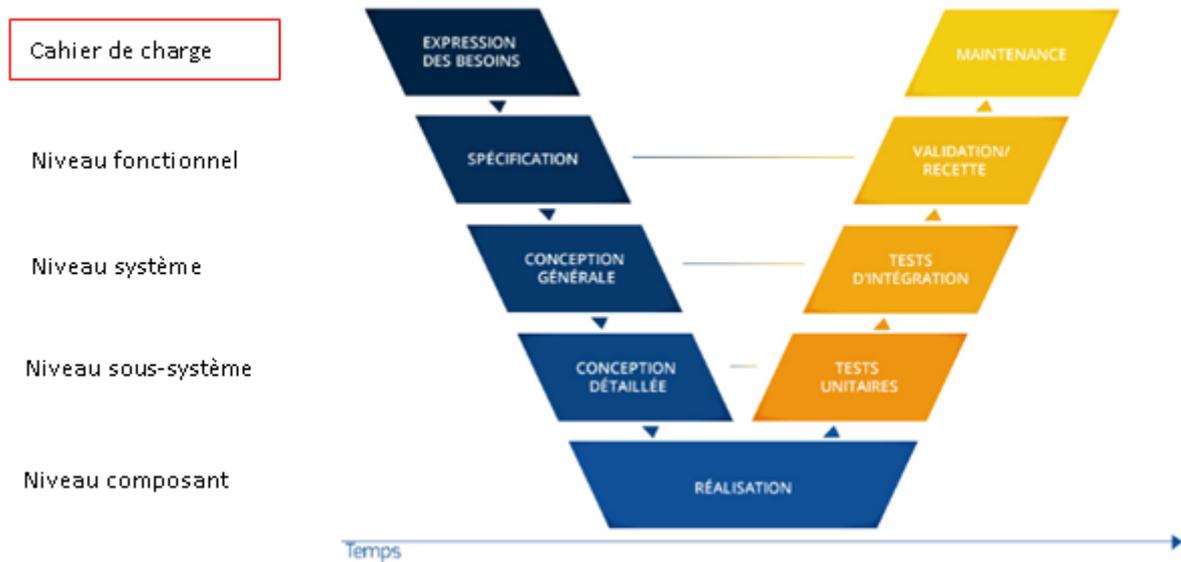


Figure 2.5: Cycle en V d'un produit mécatronique

et leur fonctionnalité est rendue possible par cette approche système au prix d'efforts importants dès les premières phases de conception. Cela entraîne des besoins méthodologiques importants en phase amont de développement, notamment au niveau système où l'interaction entre les parties opérative et de commande est conséquente, et nécessite l'utilisation du prototypage virtuel (la modélisation et la simulation) [Lebrun, 2003]. Le niveau fonctionnel définit les fonctionnalités du produit et les scénarios de son exploitation. Le niveau système représente la vue physique du produit, en termes d'architecture (nombre et interactions des sous-systèmes, choix des technologies d'actionnement hydraulique, mécanique, électrique, pneumatique) et de fourniture d'énergie d'une part, et de sa commande d'autre part (choix et placement de capteurs, architecture électronique, architecture et théorie de la commande, architecture logiciel) [Isermann, 2008]. Plus les caractéristiques d'un système sont appréhendées tôt dans son cycle de vie, moins les risques financiers ou reliés à la sûreté des installations dus à la non réalisation des performances attendues sont élevés. Dans un contexte d'exigences de systèmes de plus en plus fiables et sûrs, et de durées de garanties croissantes, il est impératif de vérifier le plus tôt possible que les performances des systèmes sont conformes au cahier des charges.

2.3 Exemples des systèmes mécatroniques

2.3.1 Cœur artificiel CARMAT

Le cœur artificiel CARMAT est un dispositif médical dont le but est de fournir une solution pérenne aux patients souffrant d'insuffisance cardiaque terminale sans traitement alternatif. Ce cœur artificiel (figure 2.6) implantable est le résultat de quinze années de recherches initiées par le professeur Alain Carpentier avec la participation du [Cetim], puis poursuivies au sein de Carmat, société créée avec Matra (aujourd'hui EADS). Le premier prototype pesant 900 grammes et de volume optimisé a été modélisé en 2008. Les premiers prototypes ont été lancés en fabrication. L'objectif est de construire un cœur artificiel fiable,

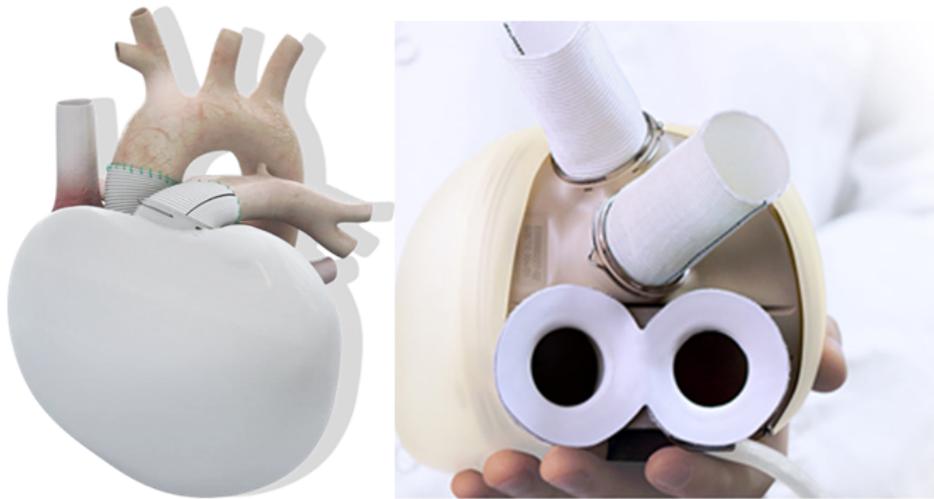


Figure 2.6: Cœur artificiel CARMAT

implantable, donc biocompatible, dans un volume sensiblement identique à celui de l'organe naturel, dans lequel il y a 3 innovations majeures :

- **Biocompatibilité** : Le seul cœur artificiel dont les surfaces en contact avec le sang sont constituées de matériaux biocompatibles qui réduisent les risques thromboemboliques.
- **Pulsatilité** : L'actionnement hydraulique entraîné par le groupe motopompe reconstitue les deux temps du rythme cardiaque : diastole lors du remplissage des ventricules par le sang et systole lors de l'éjection du sang vers les organes.
- **Auto régulation** : Le premier cœur artificiel intelligent apportant une réponse immédiate et automatique aux besoins métaboliques du patient.

Le cœur humain est une pompe. Le cœur artificiel est donc constitué de pompes volumétriques qui amènent le sang dans le ventricule et le chassent pour le remettre dans le circuit sanguin. Le ventricule est séparé en deux parties par une membrane : d'un côté, la pompe et un fluide (une huile siliconée), de l'autre, le sang ; entre les deux, une membrane souple. Lorsqu'il faut chasser le sang du ventricule, la pompe envoie du liquide dans la cavité. La membrane gonfle et chasse le sang du ventricule. Le processus inverse assure le remplissage du ventricule avec le sang.

Bien évidemment, le système ne peut fonctionner sans une électronique de contrôle sophistiquée qui permet d'adapter le débit de sang aux efforts du patient, comme le fait un cœur normal. Dans ce but, un capteur de pression est placé dans la partie qui contient le liquide hydraulique et un système d'électronique de puissance permet d'activer la pompe. La synchronisation est assurée par un microprocesseur, par l'intermédiaire d'un logiciel inspiré du fonctionnement d'un cœur réel.

Pour assurer un fonctionnement optimal, le processeur intègre également les données en provenance de deux capteurs complémentaires. L'un mesure le débit de la pompe, l'autre, un capteur ultra-sonore, contrôle en permanence la position de la membrane. L'intégration de toutes ces données permet d'en vérifier la cohérence et donc d'assurer une sécurité maximale. Un dernier capteur est mis en œuvre dans le

cœur Carmât : un micro accéléromètre, il permet de savoir si le porteur est en position debout ou couchée, adaptant ainsi le régime du cœur artificiel.

2.3.2 l'Active Wheel® de Michelin

Active Wheel, mise au point par Michelin, est une technologie révolutionnaire réinventant la roue. Pour la première fois, la roue intègre non seulement le pneu et le système de freinage, mais aussi la motorisation du véhicule ainsi que sa suspension électrique.

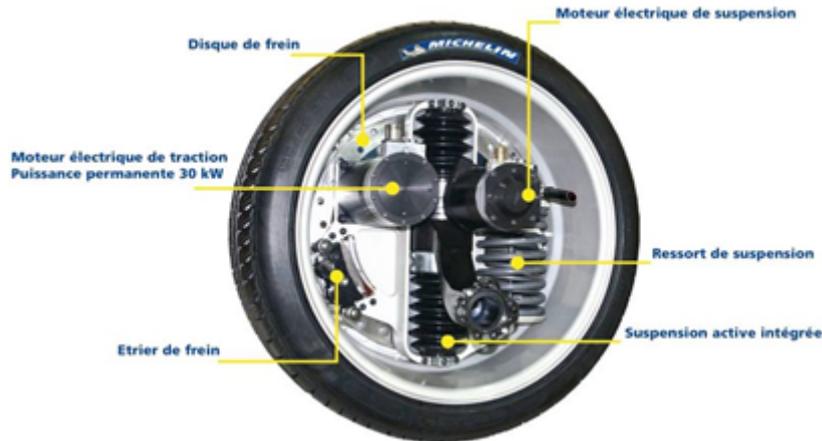


Figure 2.7: Active Wheel de Michelin

Active Wheel (figure 2.7) est un ensemble de fonctions intégrées dans la roue et qui comprend, en plus de ses fonctions habituelles, le moteur électrique de traction, un moteur et le système de suspension active électrique qui permet de faire varier la hauteur de la caisse sur une course importante et de corriger automatiquement le roulis et le tangage, mais aussi d'incliner la caisse dans les virages pour améliorer la tenue de route, et un système de freinage à ventilation forcée. L'Active Wheel tente de limiter les masses non suspendues, et donc l'inertie de la roue, par rapport à un moteur roue classique et, par conséquent, de préserver la tenue de route, ce qui était jusqu'ici un point faible du concept moteur-roue.

2.3.3 Système de commandes de vol fly by wire d'Airbus

Le Concorde avait inauguré des commandes de vol électriques analogiques sur un avion civil. L'Airbus A320, qui a effectué son premier vol en 1987, est le premier avion civil à avoir intégré des commandes de vol entièrement numériques dites fly by wire (Figure 2.8). Le problème est de remplacer les commandes de vol mécaniques par un système numérique revient à confier à des calculateurs et à leur logiciel une fonction de sécurité extrêmement critique.

Avec le fly by wire, un lourd et complexe système mécanique de bielles et de câbles est remplacé par un ordinateur et un fil électrique. Là où un manche à balai agissait directement sur les différentes gouvernes, c'est désormais un ordinateur informatique qui est aux commandes. Il reçoit les ordres du pilote via une sorte de joystick—manche latéral, ou side stick, en anglais, est le terme exact – et envoie un signal électrique à un ensemble de servocommandes hydrauliques qui pilotent les gouvernes.

Le grand enjeu est d'obtenir un niveau de sécurité compatible avec les exigences extrêmement sévères de l'aéronautique. Pour y parvenir, le système mécanique était au départ très complexe. Il devait en effet être robuste à la rupture, pouvoir supporter différents types de coincement de câbles. D'où, par exemple, un système redondant où les côtés gauche et droit de l'avion devaient pouvoir être découplés. La solution était complexe mais bien connue et maîtrisée. Pour obtenir un même degré de sécurité avec du logiciel, puisque c'est lui qui, désormais, transmet les ordres du pilote à l'avion, ce n'est pas moins de cinq ou six (selon l'avion) calculateurs qui sont embarqués. Ce nombre est celui qui assure une redondance et une fiabilité maximales du système.

Avec le fly by wire, le gain le plus immédiat est l'allègement de l'avion – quelques centaines de kilos. Cela se traduit naturellement par des économies de carburant. La maintenance est également facilitée puisque le système est moins complexe. La commande électrique a également un impact positif sur la précision de pilotage : le très long ensemble mécanique que constituaient ces câbles, bielles et autres renvois, imposait d'amples mouvements du manche à balai. Avec l'électronique, de petites impulsions suffisent. Ce sont les atouts les plus immédiats. En réalité, les conséquences du passage à l'électronique sont beaucoup plus vastes.

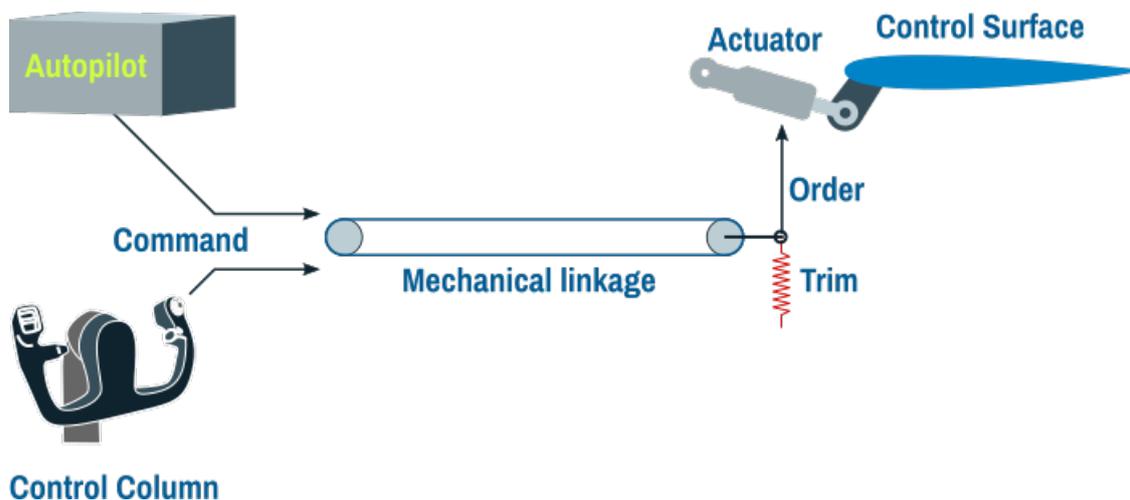


Figure 2.8: Système fly by wire d'Airbus

La spécificité mécatronique est d'installer des commandes de vol numériques, c'est remplacer la mécanique par du logiciel. Comme chaque fois que cela se pratique, les impacts s'étendent bien au-delà d'une simple comparaison de performances entre un « avant » mécanique et un « après » logiciel. Ainsi, sur un avion certaines gouvernes (les spoilers) ont trois fonctions différentes. Avec la seule mécanique il était quasiment impossible d'optimiser simultanément ces trois fonctions. Avec le logiciel, cela ne pose plus aucun problème. À mesure que progressent ces commandes de vol, cette intégration des lois de pilotage va plus loin. Elle a d'abord permis de donner aux différentes familles d'avions du constructeur un comportement quasi standard et donc, pour les pilotes, le même « feeling » en termes de pilotage. Outre le bénéfice en agrément pour les pilotes, cela se traduit par de substantielles économies pour les compagnies aériennes, en terme, de formation et d'exploitation de leur flotte.

Enfin, sur les générations les plus récentes d'Airbus, intégrer les lois de pilotage dans le logiciel a eu un effet puissant sur l'architecture même de l'avion, le constructeur a en effet défini des lois qui ont permis

de minimiser, par exemple, la charge sur les structures ou encore de minimiser l'effet des turbulences. Cela a eu un impact direct sur la conception de l'avion en permettant par exemple d'alléger significativement certaines structures.

2.4 Notions de Sûreté de Fonctionnement

2.4.1 Définitions

Dans cette section, les différentes notions de Sûreté de Fonctionnement (SdF) sont présentées. Des développements de ces notions peuvent être trouvés dans la littérature [[Lewis and Lewis, 1987](#)], [[Yang, 2007](#)], [[Villemeur, 1992](#)].

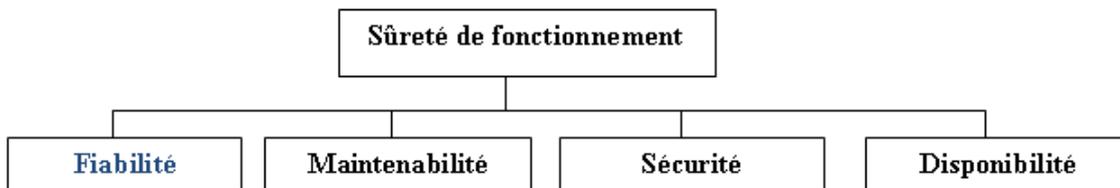


Figure 2.9: Sûreté de fonctionnement (SDF) [[Villemeur, 1992](#)]

La sûreté de fonctionnement (SdF) peut être définie, au sens large, comme la science des défaillances. Elle inclut leur connaissance, leur évaluation, leur prévision, leur mesure et leur maîtrise. La Sûreté de Fonctionnement (figure 2.10) a pour objectif de spécifier, concevoir, réaliser et exploiter des systèmes où la faute est naturelle, prévue et tolérable. La SdF est la propriété d'un système permettant à ses utilisateurs de placer une confiance justifiée dans le service délivré. Au sens strict, la Sûreté de Fonctionnement est l'aptitude d'une entité à satisfaire une ou plusieurs fonctions requises dans des conditions données. Elle peut être caractérisée par les attributs suivants:

2.4.2 La fiabilité

Il s'agit de l'aptitude d'une entité à accomplir les fonctions requises dans des conditions données pendant une durée donnée. Elle est caractérisée par la probabilité notée $F(t)$ que l'entité E accomplisse ces fonctions, dans les conditions données pendant l'intervalle de temps $[0,t]$, l'entité n'étant pas en panne à l'instant 0.

2.4.3 La disponibilité

C'est l'aptitude d'une entité à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné. La disponibilité est généralement mesurée par la probabilité qu'une entité soit en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant t donné.

2.4.4 La maintenabilité

C'est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est effectuée dans des conditions données avec des procédures et

des moyens prescrits. Elle est généralement mesurée par la probabilité que la maintenance d'une entité réalisée dans des conditions données, avec des procédures et des moyens prescrits, soit achevée au temps t , sachant que l'entité est défaillante à l'instant $t = 0$.

2.4.5 La sécurité

C'est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques. La sécurité est généralement mesurée par la probabilité qu'une entité évite de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques. Ces grandeurs caractéristiques de la sûreté de fonctionnement sont régies par un certain nombre d'interactions.

- une mauvaise fiabilité peut impliquer une mauvaise disponibilité du système dans le cas d'une forte fréquence de défaillances;
- une mauvaise fiabilité peut impliquer une mauvaise sécurité, car il est statistiquement prouvé que l'occurrence d'accident est souvent liée à l'apparition d'une défaillance du système;
- une mauvaise maintenabilité peut impliquer une mauvaise disponibilité puisqu'elle provoque une augmentation du nombre de défaillances;
- une mauvaise maintenabilité peut impliquer une mauvaise sécurité;
- des contraintes élevées en matière de sécurité conduisent à une mauvaise disponibilité. Un système peut être fiable et maintenable sans pour autant être sécuritaire.

La figure suivante résume les liens entre fiabilité, maintenabilité, disponibilité et sécurité:

2.4.6 Durées fondamentales en sûreté de fonctionnement

Afin d'évaluer les performances en SdF, plusieurs métriques de fiabilité et de disponibilité ont été définies.

MTTF (Mean Time To Failure) est la durée moyenne de fonctionnement d'une entité avant la première défaillance :

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt; \quad (2.1)$$

MUT (Mean Up Time) est la durée moyenne de fonctionnement après réparation. Si le système possède un seul bon état de fonctionnement, alors

$$MUT = MTTF. \quad (2.2)$$

MDT (Mean Down Time) est la durée moyenne d'indisponibilité.

MTBF (Mean Time Between Failure) est la durée moyenne entre deux défaillances consécutives d'une entité réparable :

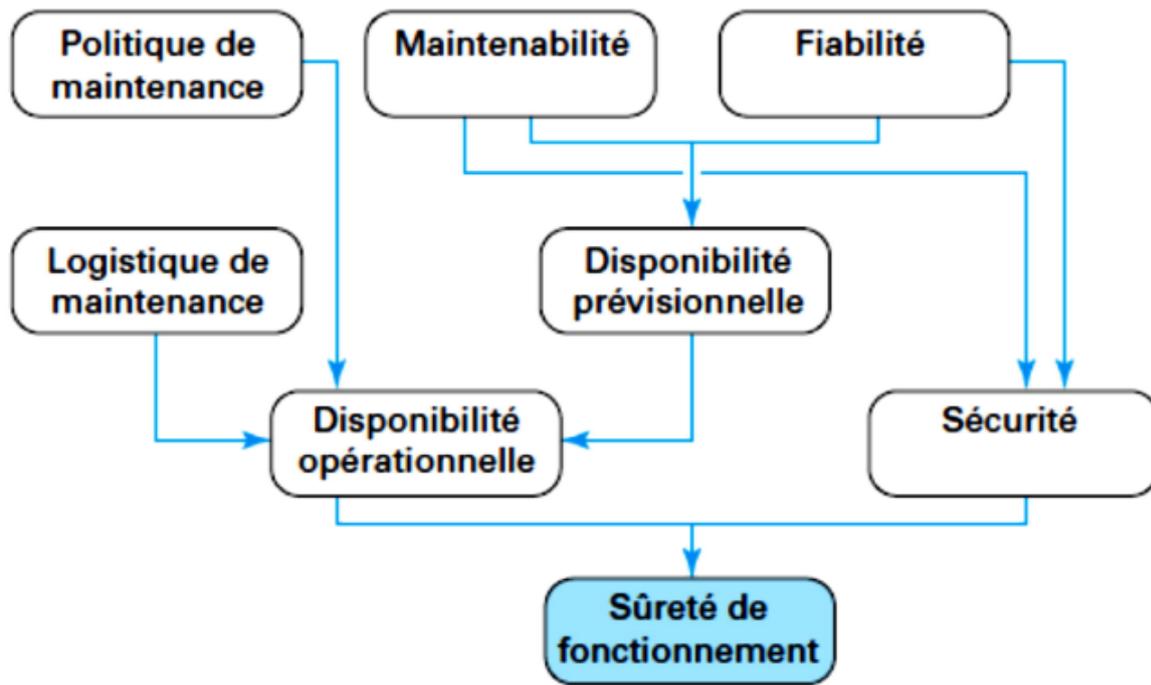


Figure 2.10: Relations entre les éléments de Sûreté de fonctionnement [Villemeur, 1992]

$$MTBF = MUT + MDT \tag{2.3}$$

La figure 2.11 illustre ces définitions de durées fondamentales :

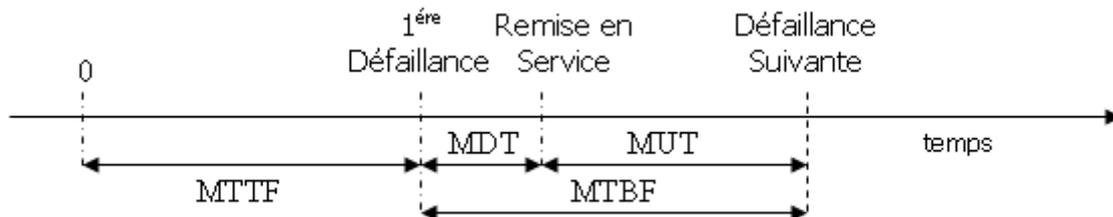


Figure 2.11: Durées fondamentales en sûreté de fonctionnement

2.5 Fonction de fiabilité

2.5.1 Définition

La fiabilité d'un système (une voiture, un avion, un moteur, une carte électronique, etc.) est la probabilité que ce système accomplisse ses fonctions, dans des conditions données pendant un intervalle de temps donné depuis sa mise en service [Yang, 2007]. T est une variable aléatoire qui associe à un système le Temps de bon fonctionnement (TBF) Time Between Failures. La fiabilité $R(t)$ d'une entité E peut s'exprimer par :

$$R(t) = P(E \text{ non défaillante sur la durée } [0, t]) = P[T > t] \quad (2.4)$$

T est la variable aléatoire qui à tout dispositif associe son temps de bon fonctionnement ou sa durée de vie avant une défaillance. L'allure de la fonction $R(t)$ présentée en figure 2.12.

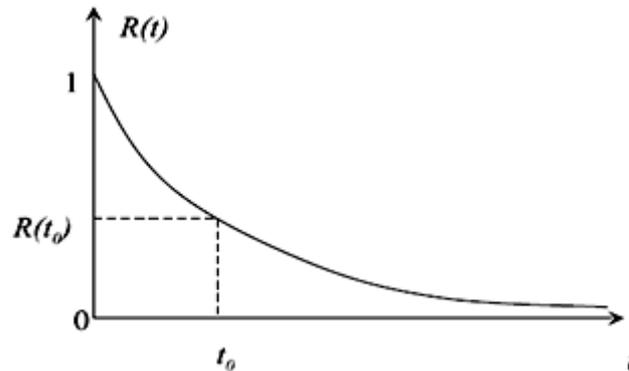


Figure 2.12: Courbe de survie ou de fiabilité

La caractéristique contraire est appelée défiabilité ou probabilité de défaillance. Elle est telle que

$$F(t) = 1 - R(t) \quad (2.5)$$

La densité de probabilité de T, notée $f(t)$ est appelée la densité de défaillance et elle est donnée par:

$$f(t) = \frac{\partial F(t)}{\partial t} = -\frac{\partial R(t)}{\partial t} \quad (2.6)$$

Importance de la fiabilité

Pour l'utilisateur : selon le produit et la défaillance, il peut y avoir inconfort, dépenses ou accident. Inconfort quand l'interrupteur de l'éclairage intérieur d'une voiture fonctionne mal à l'ouverture des portes, dépenses quand les réparations sont fréquentes et nécessitent un personnel spécialisé, accident lorsque la pièce maîtresse d'un véhicule casse et met en danger la vie des occupants. Pour l'entreprise : si des défaillances importantes se produisent pendant la période de garantie, des dépenses apparaissent rapidement et risquent d'être très importantes si la sécurité des utilisateurs est en cause. Pour des incidents mineurs, généralement hors garantie, les conséquences sont plus lointaines mais plus imprévisibles, comme l'abandon de fidélité à la marque et la mauvaise réputation.

2.5.2 Les phases de fiabilité

Dans le cycle de développement d'un produit [Yang, 2007], on distingue trois phases d'études de fiabilité, illustrées dans la figure 2.13.

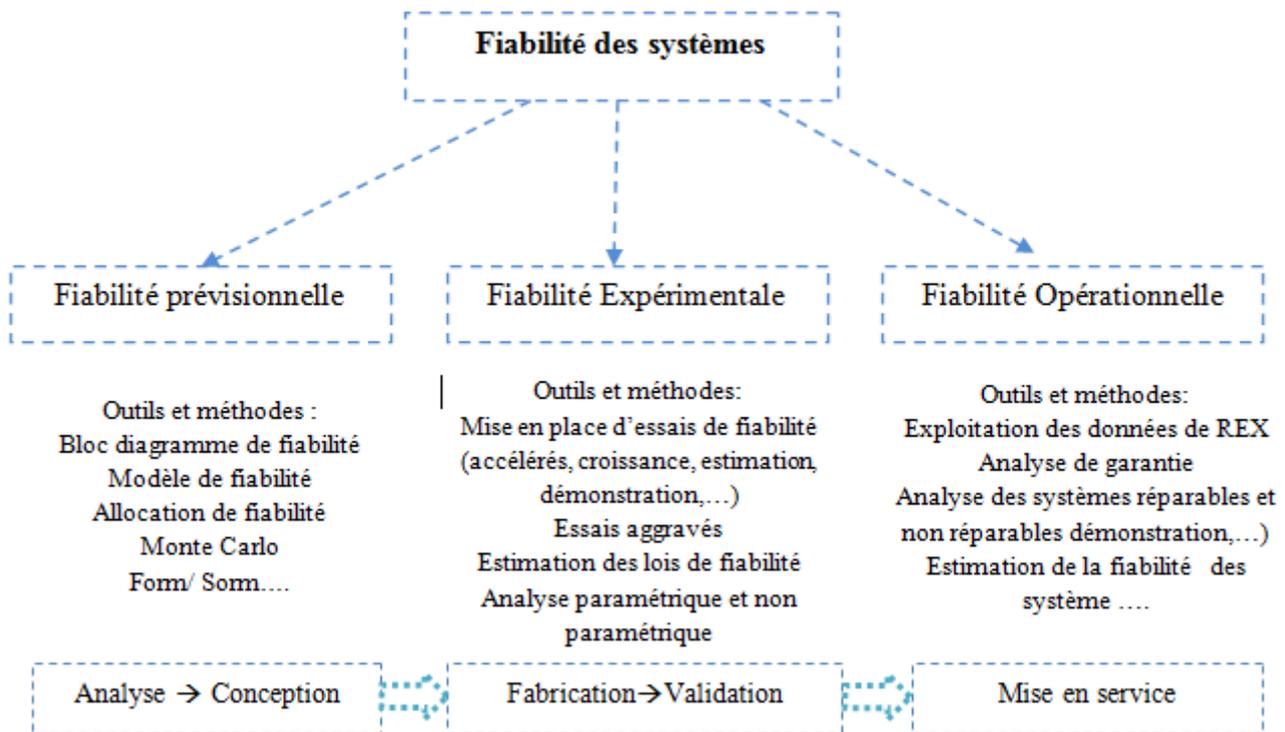


Figure 2.13: Phases de fiabilité d'un système selon le cycle en V

La fiabilité prévisionnelle:

Elle correspond à la fiabilité future d'un système, prédite à partir des fiabilités de ses composants, dans les phases d'analyse-spécification-conception [Lyonnet et al., 2006]. Cette activité consiste à évaluer a priori la probabilité pour qu'un système accomplisse sa fonction sur un intervalle de temps donné. Cette probabilité dépend des fiabilités des composants du système et de la manière dont ils concourent à la réalisation de la fonction du système [Elsayed, 2012]. Le comportement de chaque constituant élémentaire est représenté par des modèles de probabilité mathématiques et de vieillissement physique. Cette phase consiste à étudier la fiabilité dès les premières phases du projet à travers la mise en œuvre des outils existants pour des analyses qualitatives, tels que l'AMDEC et quantitatives (AdD, BD, Chaînes de Markov, RdP) qui sont exploités en terme de modélisation de dysfonctionnement du système.

La fiabilité expérimentale:

Elle est estimée à partir des résultats des essais de robustesse (appelés également essais aggravés), réalisés afin de connaître les faiblesses et les marges de conception. Ces essais sont menés dans les phases de fabrication-vérification-validation.

La fiabilité opérationnelle:

C'est la fiabilité observée ou estimée, elle est calculée à partir du retour d'expérience des entités identiques mises en service dans les mêmes conditions opérationnelles; cette dernière phase se déroule lors de la mise en service.

2.5.3 Définition d'une défaillance

Une défaillance est la cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise. La défaillance d'une entité résulte de causes qui peuvent dépendre des circonstances liées à la conception, la fabrication ou l'emploi et qui ont entraîné la défaillance. Enfin, le mode de défaillance est l'effet par lequel une défaillance est observée (définition de la Commission Électrotechnique Internationale).

2.5.4 Taux de défaillance

Le taux de défaillance λ décrit le temps écoulé jusqu' à une défaillance, ou l'intervalle de temps entre deux défaillances. C'est la limite, quand elle existe, du quotient de la probabilité conditionnelle pour quel instant T d'une défaillance d'une entité E soit compris dans un intervalle de temps donné $[t, t + \delta]$, par la durée de l'intervalle de temps, lorsque t tend vers 0 en supposant que l'entité n'a pas eu de défaillance sur $[0, t]$.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{1}{R(t)} \frac{\partial R(t)}{\partial t} \quad (2.7)$$

Il est fréquent de représenter l'évolution du taux de défaillance au cours du temps t selon une courbe caractéristique dite en baignoire illustrée dans la figure 2.14. Cette courbe se décompose en trois parties :

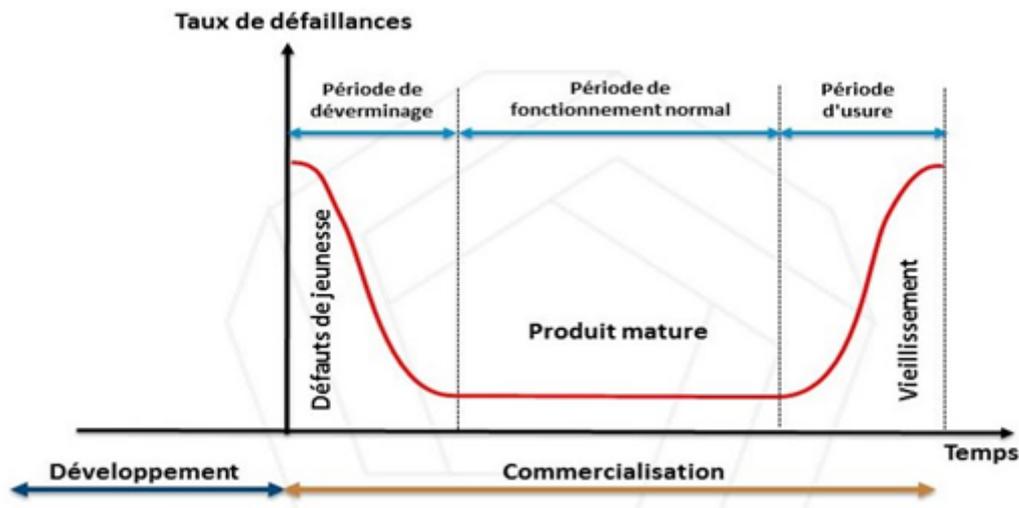


Figure 2.14: Courbe baignoire de taux de défaillance

- la première concerne les défaillances précoces dues à des problèmes de conception (mauvais dimensionnement d'un composant...) ou de production (dérive d'un processus de fabrication...).
- la deuxième partie, pouvant être plus ou moins importante selon le type de matériel (plus pour l'électronique et moins pour la mécanique et l'électromécanique), est caractéristique des défaillances aléatoires,
- la troisième partie correspond aux défaillances dues à des phénomènes d'usure, de vieillissement.

Le taux de défaillance est un indicateur essentiel dans l'analyse de la fiabilité des composants. En effet, le taux de défaillance λ de chacun des composants constitutifs d'un équipement doit être estimé afin de pouvoir calculer un taux de défaillance au niveau de l'équipement lui-même.

Un exemple défini par des standards aéronautiques, représente les défaillances catastrophiques, pouvant empêcher la poursuite du vol ou de l'atterrissage. Ce taux est ensuite comparé au niveau de DAL (Design Assurance Level) [El Hami et al., 2017]. L'ensemble de ces niveaux de criticité et les taux de défaillance, qui leurs sont associés, sont présentés dans le tableau 2.1.

Niveaux de DAL	Taux de défaillance	Gravité de la défaillance de Haut niveau
A	10^{-9} heure	Catastrophic: la défaillance peut causer un crash. Une erreur ou une perte d'une fonction critique
B	10^{-7} heure	Hazardous: la défaillance peut avoir un impact négatif sur la sécurité ou la performance peut réduire la disponibilité de personnel navigant par un sur-stress ou une plus grande charge de travail on peut causer des blessures graves aux passagers
C	10^{-5} heure	Major: la défaillance est significative, les passagers peuvent être victime d'un inconfort sensible et le personnel navigant d'une surcharge de travail
D	10^{-3} heure	Minor: la défaillance est notable, mais un impact moins que major, par exemple un inconfort passager tel qu'un déroutement
E	-	No effect: la défaillance n'a pas d'un impact sur la sécurité, l'avion ou la charge de travail du personnel navigant

Table 2.1: Critères associé aux niveaux DAL

2.6 Les principales lois de fiabilité

Nous présentons dans cette section quelques distributions de vie qui interviennent le plus fréquemment dans l'analyse de la fiabilité. Nous énoncerons les principales propriétés de ces lois (voir [Elsayed, 2012]), les fonctions de survie (Fiabilité) associées ainsi que les taux de défaillance.

2.6.1 Loi exponentielle

Cette loi a de nombreuses applications dans plusieurs domaines. C'est une loi simple, très utilisée en fiabilité dont le taux de défaillance est constant. Elle décrit la vie des matériels qui subissent des défaillances brutales.

$$R(x) = e^{-\lambda t} \quad (2.8)$$

La densité de probabilité :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (2.9)$$

2.6.2 Loi de Weibull

La plus populaire des lois, souvent utilisée aussi bien en mécanique ; elle caractérise mieux le comportement du produit dans les trois phases de vie : période de jeunesse ($\beta < 1$), période de vie utile ($\beta < 1$) et période d'usure ou vieillissement ($\beta > 1$).

La fonction de survie d'une loi de Weibull de paramètres η et β est :

$$R(t) = e^{\left(\frac{-t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.10)$$

La densité de probabilité :

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{\left(\frac{-t}{\eta}\right)^\beta} \quad (2.11)$$

Taux de défaillance :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (2.12)$$

2.6.3 Loi normale

La loi normale est très répandue parmi les lois de probabilité car elle s'applique à de nombreux phénomènes. La fonction de densité est définie par la moyenne μ et l'écart type σ :

La fonction de répartition est donnée par:

$$F(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad (2.13)$$

La fonction de densité est :

$$f(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{t-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (2.14)$$

2.6.4 Loi uniforme

La loi uniforme est souvent utilisée en fiabilité pour les essais bayésiens en l'absence de connaissances pour construire l'information a priori. Cette loi peut prendre toute valeur dans un intervalle (a, b) avec une densité de probabilité constante.

La fonction de répartition:

$$F(t) = \frac{t - a}{b - a} \quad (2.15)$$

La fonction de densité:

$$f(t) = \frac{1}{b-a} \quad (2.16)$$

2.6.5 Loi Bêta

Cette loi représente, en particulier, la probabilité pour qu'un matériel survive jusqu'à un instant t , quand on essaie n matériels. D'où son intérêt dans l'évaluation de la durée des essais de fiabilité. La loi Bêta a deux paramètres a et b :

$$F(t) = \frac{\Gamma(a+b)}{\Gamma(a)\Gamma(b)} t^{a-1} (1-t)^{b-1} \quad (2.17)$$

2.6.6 Autres lois

Il existe d'autres lois de probabilité comme : la loi lognormale, la loi binômiale, la loi de Poisson, la loi hypergéométrique, etc. tout dépend de la nature de composant et des variables discrètes ou continues (Voir tableau): probabilité :

- les lois de probabilité discrètes sont utilisées, par exemple, lorsqu'il s'agit de quantifier la défaillance à la sollicitation, qui se produit lorsqu'une entité refuse de changer d'état lorsque cela lui est demandé.
- les lois de probabilité continues sont associées aux variables aléatoires continues, par exemple, lorsqu'il s'agit de quantifier la durée de bon fonctionnement d'une entité.

Type de variable aléatoire	Nom de loi	Application
Discrète	Loi bi-nomiale	Défaillance à la sollicitation
	Loi de Poisson	Défaillance à la sollicitation lorsque le nombre d'expériences est élevé et quand l'espérance mathématique de la variable aléatoire est constante
Continue	Loi de Weibull	Taux de défaillance décroissant, croissant ou constant
	Loi exponentielle	Taux de défaillance constant
	Loi normale	Incertitude liée à des mesures et fabrication
	Loi Log-Normale	Données de défaillances dues à la fatigue
	Loi gamma	Très générale

Table 2.2: Utilisation des lois de probabilité

2.7 Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons présenté une courte introduction des systèmes mécatroniques, leurs principales caractéristiques et leurs applications industrielles à travers des exemples. Du fait de leur complexité, la conception des systèmes mécatroniques est une tâche ardue qui nécessite de prendre en compte l'aspect pluridisciplinaire sous-systèmes intègres dès les premières phases de développement. Cette complexité globale se rajoute à la complexité inhérente à chaque domaine. Cette fusion multi-domaine a pour objectif d'améliorer les performances de système conçu rend la mission difficile aux fiabilistes.

Nous avons également présenté des notions de sûreté de fonctionnement en définissant la disponibilité, la maintenabilité et la fiabilité, ainsi que les éléments de bases pour le calcul de la fiabilité d'un système mécanique, électronique, . . . et d'analyse leur mécanisme de défaillance . Le périmètre étudié dans cette thèse a alors pu être précisé. Il s'agit de l'étude de la fiabilité prévisionnelle de ces systèmes mécatroniques, en prenant en compte leurs complexités. Pour ce faire, Nous présenterons dans la suite un état de l'art exhaustif des méthodes utilisées pour l'évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques, en mettant en évidence les principales difficultés de ces études.

État de l'art des méthodes d'évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques

Dans cet état de l'art, nous présentons brièvement les travaux sur la sûreté de fonctionnement des systèmes mécatroniques. Ensuite, les travaux d'évaluation de la fiabilité seront détaillés en fonction des aspects traités (dynamique, hybride, interactif et reconfigurable), ainsi que les modèles existants pour chaque domaine (mécanique, électronique, informatique, . . .). Une synthèse présentera les différentes contributions selon les critères et les modèles utilisés et permettra de mettre en évidence les pistes de recherche à traiter par la suite dans le cadre de nos travaux de thèse.

3.1 Sûreté de Fonctionnement des systèmes mécatroniques

La SdF [Villemeur, 1992] est l'aptitude d'un système mécatronique lui permettant de disposer des performances fonctionnelles et techniques spécifiées, au moment voulu, pendant la durée prévue, sans présenter de dommages pour les personnes, les biens et son environnement.

G. Moncelet [Moncelet et al., 1998a] a proposé une modélisation d'un système mécatronique, quantitative et qualitative qui permet de prendre en considération l'aspect dynamique (en utilisant les réseaux de Petri colorés). L'objectif est d'identifier les scénarios conduisant aux événements redoutés par une simulation de Monte Carlo. Cette méthodologie a été appliquée dans le domaine de l'automobile sur le dispositif de contrôle de pression et sur la suspension active. Ziegler [Ziegler, 1996] a étudié la sûreté de fonctionnement des systèmes mécatroniques à l'aide de la modélisation par réseaux de Petri (RdP) stochastiques, en traitant l'aspect dynamique du système. Cette méthode a été appliquée à l'étude de la sûreté de fonctionnement de l'airbag et de la direction électrique.

Dans [Khalfaoui, 2003], [Demmou et al., 2004], une méthode de recherche des scénarios redoutés est proposée pour l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes mécatroniques du monde auto-

mobile, à partir d'un modèle RdP et à l'aide de la logique linéaire. La recherche des scénarios redoutés critiques est réalisée en partant de l'état défaillant et en revenant à l'état de fonctionnement normal. Toutefois l'analyse quantitative n'est pas réalisée, l'ordre d'occurrence des événements n'est pas pris en compte et les scénarios générés ne sont pas minimaux. Cette approche a été reprise en intégrant une nouvelle version de l'algorithme [Medjoudj, 2006], qui permet d'éliminer des scénarios incohérents par rapport à la dynamique continue du système. De plus, une automatisation de cet algorithme a été faite : l'outil ESA Pétri Net (Extraction & Scénarios Analyser by Petri Net model) permet d'extraire les scénarios critiques qui mènent vers l'état redouté à partir d'un modèle RdP temporel et de vérifier certaines propriétés des systèmes pilotés par calculateurs.

Choenig [Schoenig et al., 2006] a défini, à partir des graphes de Markov, une méthodologie de conception des systèmes mécatroniques qui, dès les premières phases du cycle de développement, prend en compte les modes de reconfiguration, les composants matériels pouvant défaillir, les modes de défaillance, les événements redoutés. Cependant, les graphes de Markov ne permettent pas de considérer de manière satisfaisante la dynamique des variables continues. [Mhenni, 2014] propose d'intégrer lors de la conception d'un système mécatronique l'analyse de sa sûreté de fonctionnement, à partir de l'adaptation de l'outil Sysml (Systems Modeling Language) au contexte mécatronique. Cette méthodologie, dénommée SafeSysE, a été appliquée sur un exemple réel dans le domaine de l'aéronautique, sur les systèmes EMA (Electro Mechanical Actuator) et WBS (Wheel Brake System).

Une simulation réalisée par Alta Rica 3.0 et la simulation Monte Carlo présente une méthodologie [Aupetit et al., 2017] pour évaluer les risques, les défaillances et les incertitudes d'un système mécatronique. Cette méthodologie d'analyse de la sûreté a été appliquée sur un système aéronautique "Train d'atterrissage". Cette étude permet de prendre en compte à la fois le comportement du logiciel, la défaillance de la partie matérielle ainsi que la détection des défauts par le logiciel.

3.2 Fiabilité prévisionnelle d'un système mécatronique

Selon l'approche classique de la fiabilité des systèmes, l'estimation de la fiabilité est généralement basée sur l'hypothèse d'indépendance statistique. Ainsi, on considère que les temps de défaillance des sous-systèmes sont statistiquement indépendants et dans le cas d'une défaillance d'un composant, les autres composants ne sont pas influencés.

Pour permettre une meilleure maîtrise des risques et de la fiabilité, de nombreux travaux [Moncelet et al., 1998a], [Mihalache, 2007], [Khalfaoui et al., 2002], [Schoenig et al., 2006], [Demri, 2009a], [Belhadaoui, 2011], [Saintis et al., 2009], [El Hami and Pougnet, 2015], [Sharma and Sharma, 2015], ont montré qu'il fallait prendre en considération les aspects dynamique, hybride, interactif et reconfigurable des systèmes mécatroniques. Dans un premier temps, nous avons cherché à identifier tous les éléments qui contribuent à la fiabilité d'un système mécatronique. Pour étudier la fiabilité d'un système mécatronique, sachant qu'un tel système est une combinaison de technologies différentes (Mécanique, Électronique/ Électrique, Logiciel...), nous avons mis en perspective les études de fiabilité pour les différentes technologies, avec les études issues de ce couplage pluridisciplinaires, comme nous proposons dans la figure 3.2.

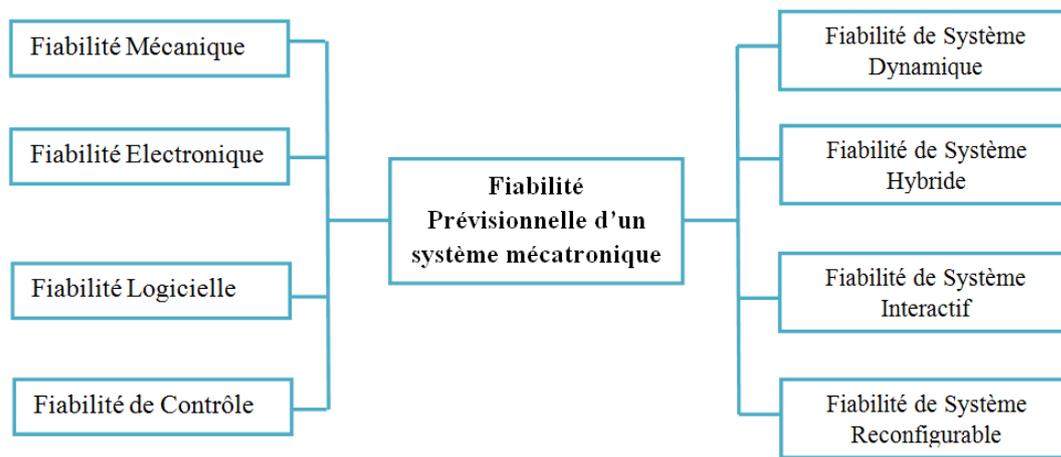


Figure 3.1: Les axes relatifs à la fiabilité prévisionnelle d'un système mécatronique

Dans la bibliographie, de nombreuses méthodes d'évaluation de la fiabilité (fiabilité mécanique, fiabilité électrique, fiabilité logicielle,..) ont été élaborées. Dans la suite du chapitre, nous présentons brièvement pour chaque technologie utilisée, les modèles fiabilistes, les lois de probabilité de défaillance de chaque composant, et les bases de données de fiabilité (taux de défaillance, taux de réparation, etc).

3.3 Étude de fiabilité selon la nature du système

3.3.1 Fiabilité des systèmes dynamiques

Les systèmes dynamiques sont caractérisés par les relations fonctionnelles entre les composants qui les constituent. Si ces relations restent figées tout au long de la mission du système, le système sera dit statique. La dynamique d'un système est telle que l'évolution physique et déterministe d'une variable environnementale est intimement liée aux événements discrets aléatoires qui vont affecter le fonctionnement des composants du système [Broy et al., 2013]. Un modèle de fiabilité dynamique permet de représenter les interactions entre des événements stochastiques discrets et des variables déterministes continues. Depuis le début des années 2000, la fiabilité dynamique peut être étudiée par différentes méthodes, telles que [Perez Castaneda et al., 2008], [Sadou and Demmou, 2009], [Broy et al., 2013], [Siu, 1994]:

- Les arbres d'événements dynamiques discrets,
- Les arbres de défaillance et les diagrammes de fiabilité avec des caractéristiques dynamiques,
- Les réseaux bayésiens dynamiques,
- La méthode graphe de flux dynamique,
- Les réseaux de Pétri stochastiques et/ou colorés,
- Des modèles markoviens pour discrétiser le temps et les autres variables continues,
- Des approches directes de simulations de Monte Carlo.

3.3.2 Fiabilité des systèmes hybrides

Les systèmes hybrides sont des systèmes faisant intervenir simultanément des phénomènes continus et d'évènements discrets [Zaytoon et al., 2001]. La particularité de ces systèmes est de comporter des interactions entre des processus physiques, modélisés par des variables continues et des évènements ponctuels (ordres du contrôle-commande, changement du profil de mission), modélisés par des processus à évènements discrets, et, de plus, des défaillances internes ou des changements de contexte imprévus, modélisés par des processus aléatoires (stochastiques) à évènements discrets.

Les approches classiques sont mal adaptées à ce type de problème. Globalement l'étude des systèmes hybrides [Belhadaoui, 2011] se fait selon deux approches: L'approche intégrée prenant en compte au sein d'un même formalisme, les aspects continus et discrets, comme les réseaux de Pétri hybrides [Babykina et al., 2012].

L'approche séparée, qui fait coopérer deux modèles différents : un pour les aspects continus et un pour les aspects discrets. L'approche séparée regroupe:

- Les modèles à base d'automate stochastique hybride (ASH) [Perez Castaneda et al., 2010],
- Des processus Markoviens Déterministes par Morceaux (PMDPM),
- Statecharts hybrides,
- Réseaux de Petri mixtes ou de réseaux de Pétri Prédicats-Transitions-Différentiels (RdP PTD).

3.3.3 Fiabilité des systèmes avec interactions multi-domaines

Un système mécatronique étant un système intégré multi-technologies, l'étude de sa fiabilité doit aussi prendre en compte les interactions multi-domaine, fonctionnelles et dysfonctionnelles entre les composants du système. Les méthodologies utilisées actuellement pour l'évaluation de la fiabilité prennent en considération uniquement les modes de défaillance associés à chaque composant, alors que la défaillance d'un composant peut avoir une influence sur le comportement d'un autre composant, de nature différente. Dans [Aubry et al., 2012], différents types d'interactions multi-domaine ont été proposés :

- Interactions multi physiques, entre les éléments mécaniques, électriques, pneumatiques, par des échanges physiques (pressurisation, chauffage, échange de chaleur, ...) engendrés lors de la dégradation d'un composant.
- Interactions entre les composants logiciels et matériels. Ces interactions sont dues à la présence de réseaux de communication, de traitement de type multi-tâche, multiplexage au sein de la commande.

Il existe assez peu de travaux prenant en compte ces interactions : [Habchi and Barthod, 2016], pour les interactions multi-physiques et [Belhadaoui, 2011], pour les interactions logiciel/matériel. Ce point a été également mentionné dans des perspectives de plusieurs travaux [Demri, 2009a], [Mihalache, 2007], dans lesquels, lors de l'analyse de sensibilité de la fiabilité d'un système mécatronique, il a été constaté que la fiabilité calculée à partir des fiabilités des composants est plus élevée que la fiabilité estimée du système. Cette différence d'estimation est due à l'existence des interactions multi-domaines entre les composants, qui devraient être prises en compte dans la modélisation du système.

3.3.4 Fiabilité des systèmes reconfigurables

Depuis une dizaine d'années, les systèmes reconfigurables suscitent un intérêt croissant. Auparavant, les systèmes étaient traditionnellement conçus pour garder la même structure et le même comportement tout au long de leur existence. En cas d'occurrence de pannes ou de changement d'objectifs, une intervention externe conséquente était requise afin de poursuivre la mission. Les systèmes reconfigurables sont développés pour accomplir une fonction donnée, dans un environnement précis [Sanchez et al., 1999]. Afin de s'adapter et de réagir d'une manière dynamique à la variation des paramètres de fonctionnement, ces systèmes sont constitués de nombreuses unités intelligentes multi-domaines inter-connectées [Trabelsi et al., 2012]. Cette structure leur confère une forte adaptabilité aux changements de l'environnement externe et aux états du système lui-même. Un tel système reconfigurable peut ainsi continuer à évoluer et accomplir sa fonction en bon rendement. La reconfiguration dynamique d'architectures à composants est utilisée comme mécanisme natif d'auto-réparation, ce qui augmente la fiabilité de système [Léger et al., 2010].

La fiabilité des systèmes reconfigurables est un axe de recherche relativement récent et peu traité dans la bibliographie. Les méthodes traditionnelles d'analyse de la fiabilité sont limitées pour ce type de système. D'une part, si le système est reconfiguré pour une fonction, sa redondance augmente et la fiabilité du système sera améliorée [Iturbe et al., 2010]. D'autre part, lorsque le nombre des composants du système augmente, la fiabilité du système diminue. Les fonctions de reconfiguration du système produisent donc des effets positifs et négatifs sur la fiabilité du système. Y a plusieurs hypothèses pour les reconfigurations [Léger et al., 2010] :

- Les reconfigurations dynamiques : Elles se produisent pendant l'exécution du système.
- Les reconfigurations concurrentes : Plusieurs reconfigurations peuvent être exécutées en même temps sur le même système.
- Les reconfigurations non-anticipées : Une reconfiguration n'est pas nécessairement définie et prévue au moment de la conception et du déploiement du système.

Ces effets ont été illustrés dans les travaux de [Demri, 2009a] ; en évaluant la fiabilité du système mécatronique ABS pour deux configurations possibles (freinage normal/freinage avec ABS). La comparaison des résultats pour chaque configuration montre l'influence de l'aspect reconfigurable sur la fiabilité totale de système. Dans [Laronde et al., 2010], le changement de configuration des cellules photo-voltaïques montre également une différence significative sur la disponibilité du système. Actuellement il n'existe pas de démarche d'évaluation de la fiabilité d'un système qui prenne en considération le changement dynamique des différentes configurations existantes.

3.4 Études de fiabilité pour les différentes technologies

Avant de définir une méthodologie d'évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques, nous présenterons les méthodes utilisées pour l'estimation de la fiabilité pour chaque technologie, avec leur spécificités et les principales sources de données de taux de défaillances : les recueils d'expérience «REX», issues de retours d'expériences auprès des fabricants des composants.

3.4.1 Fiabilité Mécanique

La fiabilité mécanique a pour objectif d'évaluer la probabilité qu'un système mécanique soit capable de résister aux plusieurs aléas et phénomènes de dégradation tels que: la fatigue, le fluage, la fissuration, l'usure, la corrosion/ l'oxydation, la désagrégation etc.) [Devictor, 1996]. Ces modes de dégradation font intervenir plusieurs paramètres [Andrieu-Renaud et al., 2004], [Tebbi, 2005]:

- Les caractéristiques des matériaux (limite élastique, limite à la rupture, limite d'endurance, limite de fatigue, ténacité, dureté, etc.),
- Les caractéristiques dimensionnelles (géométrie, etc.),
- Les sollicitations extérieures (température, chargement, pression, ...),
- La forte interaction entre le composant et son environnement (les contraintes chimiques comme l'oxydation, les vibrations, etc).

La fiabilité d'un système mécanique repose sur la fiabilité d'un nombre de composants élémentaires responsables de son dysfonctionnement, contribuant presque totalement à la probabilité de défaillance de l'ensemble. Pour une structure mécanique, la fiabilité est largement traitée dans la bibliographie, dont la probabilité de défaillance d'un mode de défaillance se fait par le calcul de une fonction $G(X)$ appelle fonction d'état, la Fiabilité d'une structure F_s

$$F_s = 1 - P_f = 1 - P(G(X) < 0) \quad (3.1)$$

Le calcul de la probabilité de défaillance P_f se fait à partir des plusieurs outils et méthodes d'approximation:

- Méthode de Monte Carlo (Voir l'annexe 7.11).
- Indices de fiabilité des structures: L'indice de Rjanitzyne en 1950, l'indice de Cornell en 1970, l'indice Hasofer et Lind en 1974, et l'indice généralisé de Ditlevsen en 1979. (Voir l'annexe 7.9.1)
- Méthode FORM (First Order Reliability Method)
- Méthode SORM (Second Order Reliability Method)

La méthode SORM consiste à remplacer la surface d'état par limite par au point de défaillance le plus probable par une surface quadratique, cela permet de modéliser le cas d'état limite non linéaire, ce qui est pas possible avec la méthode FORM (Voir l'annexe 7.9).

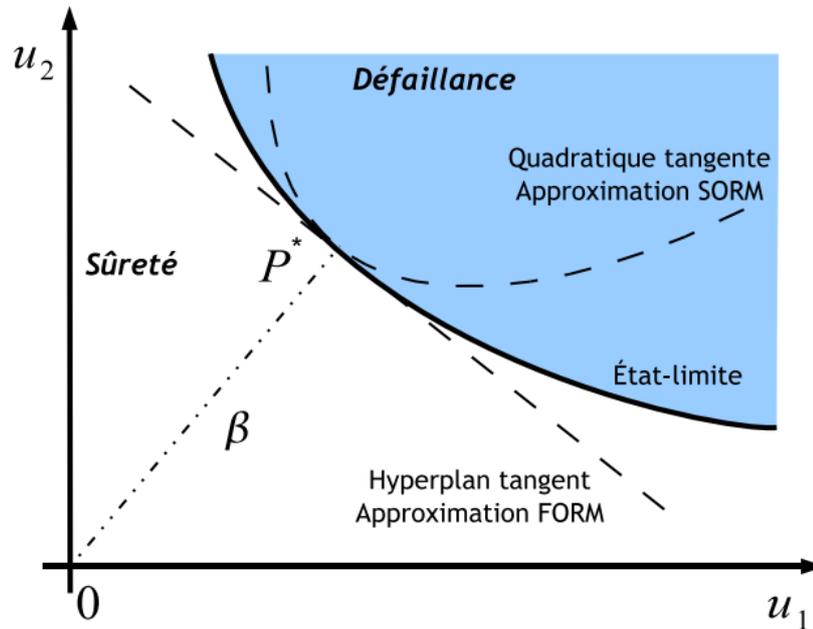


Figure 3.2: Diagramme de Methode Form

La méthode “Contrainte-Résistance”

La fiabilité d’une structure est ainsi définie par la probabilité pour que la résistance R soit supérieure à la contrainte appliquée C [Macias and Lemaire, 1997], [Baroth, 2005]

$$P_f = 1 - P_f = P(R > C) \quad (3.2)$$

La méthode déterministe “Contrainte-Résistance”, dans laquelle chaque paramètre est caractérisé par une valeur unique, est basée sur l’utilisation d’un coefficient de sécurité déterministe.

La méthode probabiliste “Contrainte-Résistance”, dans laquelle chaque paramètre est caractérisé par une distribution de probabilité que la résistance à la contrainte de la structure soit supérieure aux contraintes appliquées pendant toute la mission considérée. Les modèles mécaniques sont donnés soit explicitement soit par des calculs éléments finis (Voir l’annexe 7.10).

Couplage Mécano-Fiabiliste

Ces études menés sous l’hypothèse que la défaillance d’une structure due qu’un seul évènement, pourtant pour un système mécanique complexe, un développement d un couplage mécano fiabiliste devient indispensable pour évaluer sa fiabilité, en intégrant la méthode des éléments finis (MEF), que ce soit la méthode des éléments finis Stochastique ou Probabiliste ((MEFS ou MEFP) avec les outils de fiabilité classiques, les différents types de ce couplage sont comme suit:

- Couplage Mécano-Fiabiliste direct.
- Couplage par surfaces de réponses.

- Couplage par optimisation.

3.4.2 Fiabilité Électronique/Électrique

L'évaluation de la fiabilité électronique est pratiquée depuis de nombreuses années [Johnson and Gullo, 2000], [Foucher et al., 2002]. Les composants électroniques présentent des mécanismes de dégradation complexes [Yang et al., 2018], tels que: la surcharge (electrical over stress EOS), la polarisation, la surcharge : mécanique, thermique, chimique. . . , le décollement de fils de connexion, la migration métallique, l'électromigration, surtension, surintensité, contamination et corrosion etc.

Ces modes de défaillances vient de plusieurs facteurs:

- Température ambiante : elle est l'ennemi des composants actifs et des condensateurs. Statistiquement, le taux de défaillance d'un composant actif est 10 fois plus grand à 100°C qu'à 40°C .
- Chocs, vibrations mécaniques (caractérisables par l'accélération et la fréquence)
- Poussière, sable- humidité (condensation sur des parties froides)
- Problème de montage des composants (température de soudure dans le procédé de fabrication, etc)
- Contamination chimique : gaz corrosifs (dioxyde de soufre, oxydes d'azote, chlore, sulfure d'hydrogène, etc...) pour un circuit imprimé
- Degré de pollution sur une carte électronique.

Les bases de données de fiabilité sont disponibles et nombreuses, l'évaluation de la fiabilité prévisionnelle électronique concerne tous les composants (passifs, discrets actifs, FPGA, ASIC, etc.), dont les lois de mortalité sont reprises dans les modèles mathématiques que l'on retrouve dans des guides tels que FIDES ou MIL-HDBK 217F.

L'évaluation de la fiabilité électronique est établie par des approches probabilistes:

- Circuit Equivalent Graph CEG [Franco et al., 2008] [Dokouzziannis and Kontoleon, 1988]
- Approche basée sur l'utilisation de diagrammes de décision binaires (BDD) [Flaquer, 2011]
- Modélisation à partir de glitches de courant [Omaña et al., 2004]
- Champs Markoviens [Qi et al., 2005] Aléatoires [de Vasconcelos et al., 2008]
- Réseaux Bayésiens [Rejimon and Bhanja, 2005]
- Probabilistic Gate Model [Han et al., 2011]
- Block digramme de Fiabilité [Song and Wang, 2012]

Dans les systèmes mécatroniques [Glesner et al., 2002], les puces électroniques programmables sont largement utilisées. L'évaluation de la fiabilité de ces dernières nécessite deux études : la fiabilité physique de la puce et la fiabilité fonctionnelle de la conception intégrée [Huang and Askin, 2003]. La première prend en compte la fiabilité des connexions matérielles. La deuxième tient compte des défauts dans la configuration de la puce, ce qui peut également provoquer des erreurs en sortie. La méthode développée dans [Foucher et al., 2002] fournit une prévision de fiabilité pour un FPGA basée sur ces deux analyses.

D'autre part, la fiabilité électrique [Yang et al., 2018] est une mesure de la capacité du système à fournir l'électricité demandée en ses différents points d'utilisation selon des critères acceptables [Arifujjaman et al., 2009].

En raison de la tendance à la mise au point de systèmes plus petits et plus complexes construits à l'aide de matériaux exotiques et de processus technologiques avancés. Les échecs en prédiction de la fiabilité des systèmes électroniques sont également devenus de plus en plus intermittents.

3.4.3 Fiabilité logicielle

L'estimation de la fiabilité logicielle en phase de développement a été initiée par [Jelinski and Moranda, 1972], [Thireau, 1986], [Musa et al., 1990], [Gaudoin, 1990] et développée par la suite dans d'autres travaux de [Pham, 2000], [Pham, 2006], [Huang, 2005] [Sharma et al., 2010], [Roy et al., 2015].

Par définition, un logiciel est constitué des programmes informatiques et des données de configuration correspondantes, y compris les logiciels pré-développés. Au début du processus de développement d'un logiciel, il n'y a pas d'outil pour mesurer les données de défaillance [Pham, 2000]. Pour cela, certains modèles suggèrent d'évaluer la fiabilité des logiciels à partir des propriétés indirectes telles que la complexité des programmes ou des lignes de code. Cependant, les mesures de complexité et des approches similaires sont sujettes à la critique, car il y a beaucoup d'influences inconnues dans les phases précoces de développement.

Pour l'analyse qualitative du système logiciel, des adaptations de l'AMDE et des AdD ont été proposées, telles que l'AEEL (Analyse des Effets des Erreurs de Logiciel) [Thireau, 1986], une analyse qualitative des erreurs contenues dans le logiciel et non l'analyse des modes de défaillance. Cette analyse a pour but d'exposer aux concepteurs les points critiques identifiés. La fiabilité du logiciel ne peut pas être déterminée en testant des répliques dans les mêmes conditions environnementales que celles utilisées pour les systèmes mécaniques [Gaudoin, 1990], car les défaillances des logiciels sont dues à des fautes de conception (bugs) et les défaillances matérielles sont dues essentiellement à l'usure (ou vieillissement) et aux facteurs environnementaux. La correction des logiciels augmente leur fiabilité, tandis que la maintenance des pièces mécaniques ou électriques ralentit le vieillissement des systèmes mais ne l'empêche pas [Gaudoin, 1990].

Plusieurs modèles (plus de 100 modèles) d'estimation de la fiabilité des logiciels ont été proposés au cours des 30 dernières années, modèles dits de croissance de fiabilité:

- Modèle de J.D Musa [Musa et al., 1990],
- Modèle de B. Littlewood, [Littlewood, 1979],
- Modèle de Goel-Okumoto [Goel and Okumoto, 1979], etc

Ces modèles sont destinés à évaluer la fiabilité du logiciel au cours de son cycle de vie. Le comportement des défaillances du logiciel est décrit par un processus stochastique. D'autres méthodes pour prévoir la fiabilité des logiciels ont été proposées, basées sur l'utilisation des réseaux bayésiens [Fenton et al., 2008], ou des réseaux de neurones artificiels [Roy et al., 2015], [Pham and Pham, 2001]. D'autres études proposent également d'évaluer la fiabilité logicielle à partir des tests. Quatre grandes familles de tests se distinguent: les tests statiques, les tests symboliques, les tests dynamiques et les tests d'intégration. L'interaction logicielle-matérielle représente un verrou scientifique pour les études de fiabilité logicielle lors de son dysfonctionnement [Roy et al., 2015].

3.4.4 Fiabilité de système de contrôle

Peu de méthodologies pour prédire la fiabilité des performances d'un système de contrôle sont proposées dans la littérature [Yang et al., 2017]. L'évaluation de la fiabilité du système de contrôle permet également de définir correctement les paramètres de contrôle et de prendre des décisions concernant le choix des stratégies de contrôle alternatives.

Un système de contrôle-commande est une structure programmable utilisée pour le pilotage d'un procédé industriel. Il reçoit des informations sur l'état du procédé externe, traite ces données et, en fonction du résultat, émet une décision pour agir sur cet environnement extérieur afin d'assurer un état stable du procédé [Phillips et al., 2015]. Il permet la «dé-localisation» de certaines opérations précédemment effectuées par une unité centrale, vers les éléments du système (capteurs-transmetteurs, contrôleurs, actionneurs, etc.). Un modèle de Markov pour l'évaluation de la fiabilité de la commande d'un système de distribution est présenté dans [Liu et al., 2015]. Les méthodes traditionnelles d'analyse de la fiabilité ne sont plus appropriées et efficaces pour décrire le comportement dysfonctionnel d'un système de contrôle [Yang et al., 2017].

Une solution pour évaluer la fiabilité des performances de contrôle est proposée dans [Yang et al., 2017], utilisant une approche d'approximation analytique FORM/SORM et la simulation de Monte Carlo. L'approche FORM a été appliquée ici pour prévoir la fiabilité d'un système de contrôle d'un servo-moteur.

Un travail de conception d'un système de contrôle fiable est présente dans [Meguetta et al., 2015]. L'évaluation de la fiabilité de la mission de contrôle de la vitesse et l'accélération pour un véhicule électrique, en utilisant l'analyse structurelle et les Blocs digrammes de fiabilité, en se basant sur les données de défaillance des capteurs et des actionneurs du système étudié (Capteur de vitesse, inclinomètre, GPS...). L'analyse structurelle est un outil très important dans les aspects de contrôle et de supervision, la modélisation structurelle permet de décrire qualitativement les différentes relations entre les variables d'un système C-C (Contrôle-commande).

3.5 Travaux d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle d'un système mécatronique

3.5.1 Approche de fiabilité mécatronique par l'AMDEC et les AdD

Les arbres de défaillances (AdD) et l'AMDEC sont des outils d'analyse des défaillances bien connus. Ils ont été utilisés dans un certain nombre de domaines différents, y compris l'aérospatial, l'énergie nucléaire et l'automobile [Sharma and Sharma, 2015]. La méthode des AdD est basée sur une représentation structurelle du système. Néanmoins, cette méthode n'est utilisable que si l'architecture du système (les connexions entre les parties physiques) est inchangée pendant son mission [Guérin et al., 2009]. Une approche proposée pour prévoir la fiabilité d'un système mécatronique [Kopp et al., 2011] basée sur les AdD et l'AMDEC est présentée dans la figure 3.3.

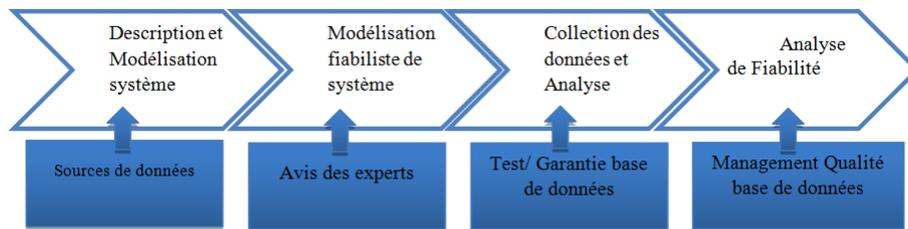


Figure 3.3: Approche AdD pour la fiabilité d'un système mécatronique [Kopp et al., 2011]

Dans les phases «Description du système et modélisation» et «Modélisation de la fiabilité», des méthodes qualitatives, telles que l'AMDEC sont généralement utilisées. Une nouvelle approche propose de collecter les données disponibles à partir de différentes sources, telles que les avis d'experts ou les bases de données avec les données de garantie du fabricant, afin d'utiliser la méthode des arbres de défaillances dans la phase «Modélisation de la fiabilité» .

Un exemple industriel (Figure 3.4) a montré l'utilité de cette approche appliquée sur le système "lève vitre de voiture", en cours de conception. Ce système est composé d'un moteur électrique, des tambours, câbles, unité de contrôle, etc.).

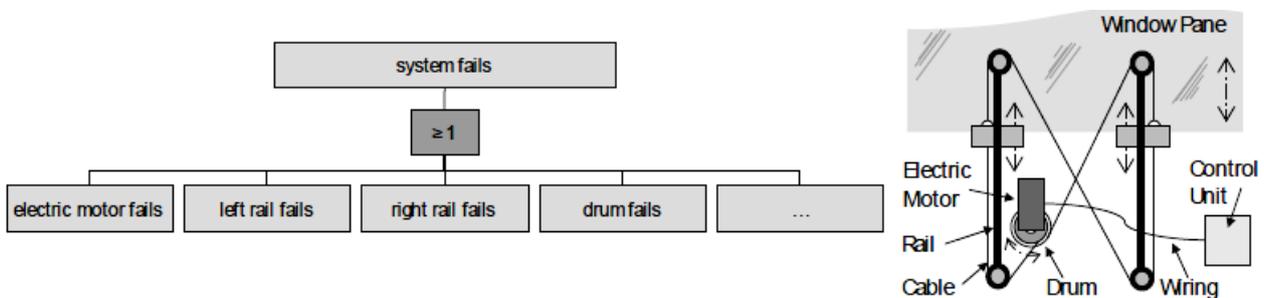


Figure 3.4: Application de l'Arbre de défaillance de lève vitre de voiture

La méthode AdD permet de mieux comprendre le comportement du système et de trouver les composants critiques, afin d'attirer l'attention des ingénieurs sur les composants essentiels à la fiabilité du

système. Néanmoins, cette démarche ne permet pas de prendre en compte les exigences particulières des produits mécatroniques complexes.

3.5.2 Approche par Réseaux de Petri pour la fiabilité mécatronique

Les Réseaux de Petri (RdP) sont un outil de modélisation et d'analyse, permettant de construire un modèle de comportement fonctionnel et dysfonctionnel [Sadou and Demmou, 2009], utilisé dans de nombreux travaux en fiabilité mécatronique [Khalfaoui, 2003], [Medjoudj, 2006], [Barreau et al., 2003], [MIHALACHE et al., 2009], [Demri, 2009a], [Laronde et al., 2010]. Le choix des RdP est intéressant pour les possibilités de traiter les phénomènes stochastiques (comme les lois usuelles de la fiabilité : exponentielle, Weibull...) par des franchissements à la sollicitation. Les RdP peuvent également traiter des variables continues et permettent une modélisation hiérarchique des systèmes mécatroniques. [Khalfaoui, 2003]. Les RdP peuvent également représenter la dynamique de système, permettant la modélisation du comportement de chaque partie physique ou fonctionnelle (pour le contrôle) et des interactions entre les composants, le modèle décrivant ainsi les comportements possibles du système.

La fiabilité d'un composant et du système peut être estimée à l'aide du modèle RdP. Les RdP permettent de modéliser le passage d'un composant du mode fonctionnel dans un ou plusieurs modes de défaillance [Barreau et al., 2003], [MIHALACHE et al., 2012], [Demri et al., 2007]. Les lois de probabilité associées aux transitions stochastiques sont des lois de probabilité de défaillance (lognormale, exponentielle, Weibull, ...), dont les paramètres (taux de défaillance λ , taux de réparation μ) sont établis à partir des différents recueils de données, en fonction de la technologie du composant.

- La distribution de Weibull est associée aux composants mécaniques ;
- La distribution exponentielle est utilisée pour caractériser la fiabilité des composants électroniques ;
- Le modèle exponentiel de temps d'exécution de Musa est utilisé pour les composants logiciels.

La démarche d'évaluation de la fiabilité d'un système mécatronique présentée en (figure 3.5), peut être appliquée dans les phases de spécification et de conception du système mécatronique [Mihalache, 2007]. Cette démarche est basée sur une analyse à la fois de l'architecture du système et des spécifications relatives aux composants.

Dans un premier temps, l'analyse fonctionnelle permet la description des modes de fonctionnement du système et la connaissance des fonctions à garantir. Il est également nécessaire de trouver les modes de défaillance des composants, les causes de ces défaillances et leurs conséquences sur le système, afin de recenser tous les états de fonctionnement et de dysfonctionnement. Après avoir construit le modèle RdP, la prise en compte des informations des recueils des données pour chaque composant permet de simuler le fonctionnement (et le dysfonctionnement) du système. En outre, afin de connaître la contribution de chaque composant à la fiabilité du système et pouvoir identifier les composants critiques du système, une étude de sensibilité a été proposée.

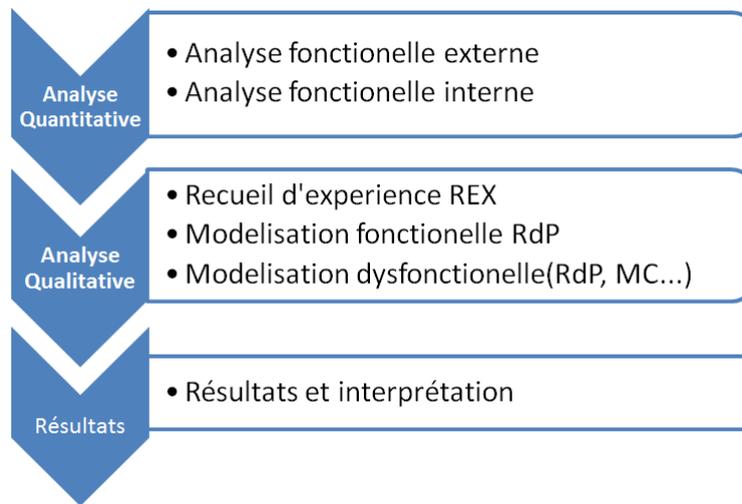


Figure 3.5: Démarche de fiabilité Prévisionnelle d'un système mécatronique par RdP

Application 1: Système ESP

Cette approche a été appliquée à l'ESP dans [Barreau et al., 2004]. L'ESP (Electronic Stability Program) est un système mécatronique automobile qui permet de corriger la trajectoire en agissant sur le système de freinage ainsi que sur le couple moteur. L'ESP est utilisé lorsque le véhicule prend un virage à trop grande vitesse ou lors d'un changement brutal de trajectoire (évitement d'obstacle) et risque de perdre sa stabilité et échapper au contrôle de son conducteur.

La matrice des transitions générée à partir du graphe d'accessibilité du modèle RdP (Figure 3.6) contient les taux de franchissement de chaque transition et permet de calculer les probabilités des différents états (de fonctionnement ou de défaillance).

Application 2: Frein ABS

Le système de freinage anti-blocage des roues «ABS» a été étudié dans plusieurs travaux d'évaluation de fiabilité [Barreau et al., 2003] [Demri et al., 2007] [Guérin et al., 2003] [Mihalache, 2007]. L'ABS est un système mécatronique, composé d'éléments mécaniques (disques de frein, pédale de frein, piston), d'un groupe hydrauliques (réservoir, liquide de frein), d'éléments électroniques (capteur de vitesse) et d'une partie logicielle (calculateur). Un modèle RdPSD fonctionnel et dysfonctionnel de l'ABS a été établi à partir d'une analyse AMDEC du système (Figure 3.7). Ce modèle prend en compte un seul mode de défaillance.

Cette démarche a été améliorée par [Mihalache, 2007], avec une modélisation physique du système mécatronique étudié, qui permet d'obtenir les variables physiques internes pour un profil de mission spécifié dans le cahier de charges.

Dans le modèle RdP dysfonctionnel (Figure 3.7), afin d'estimer les paramètres des lois de distribution associées aux transitions dysfonctionnelles des composants mécaniques, la méthode mécano-fiabiliste «PHI2» a été proposée pour calculer la probabilité de défaillance en fonction du temps $Pf(t)$. Cette méthode [Andrieu-Renaud et al., 2004] permet de calculer le taux de franchissement en utilisant la loi bi-

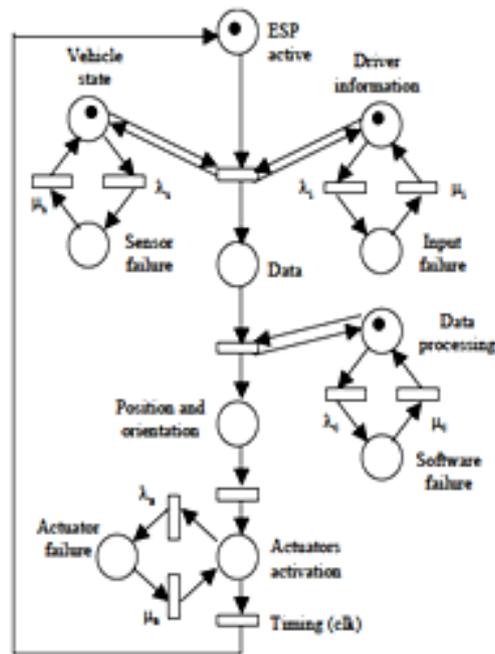


Figure 3.6: Modèle RdP du système ESP [Barreau et al., 2003]

normale. Dans [Mihalache, 2007] les résultats de l'estimation de la fiabilité prévisionnelle de l'ABS sont :

- $R(t) = 0,5$ pour $t = 918$ heures.
- $R(t) = 0,18$ pour $t = 2000$ heures.

Dans les travaux de [Demri, 2009a], l'aspect reconfigurable du système ABS est pris en compte et un modèle physique avec deux configurations de fonctionnement possibles a été proposé. Le passage entre les deux configurations se fait en fonction du taux de glissement de la roue. La fiabilité du système de freinage ABS a été estimée pour les deux configurations de fonctionnement :

- Mode de freinage sans ABS (calculateur, capteur, étrier).
- Mode de freinage avec ABS (groupe hydraulique, calculateur, capteur, étrier).

La fiabilité du système estimée à partir des fiabilités des composants est plus élevée que la fiabilité estimée directement pour le système. Cette différence est due à l'existence d'interactions multi-domaines entre les composants, interactions qui devraient être modélisées. La fiabilité prévisionnelle de l'ABS a été estimée pour les deux cas :

- $R(t)_{SansABS} = 0,97$ pour $t = 1000$ heures.
- $R(t)_{AvecABS} = 0,61$ pour $t = 1000$ heures.

La fiabilité du mode de freinage ABS est plus élevée que celle du freinage sans mode ABS, du fait de son utilisation réduite (premier temps de freinage). La différence entre les résultats d'estimation de la fiabilité de chaque configuration séparément (mode avec ou sans ABS) montre l'impact de l'aspect reconfigurable, mais le modèle RdP proposé ne permet pas de prédire la fiabilité globale du système.

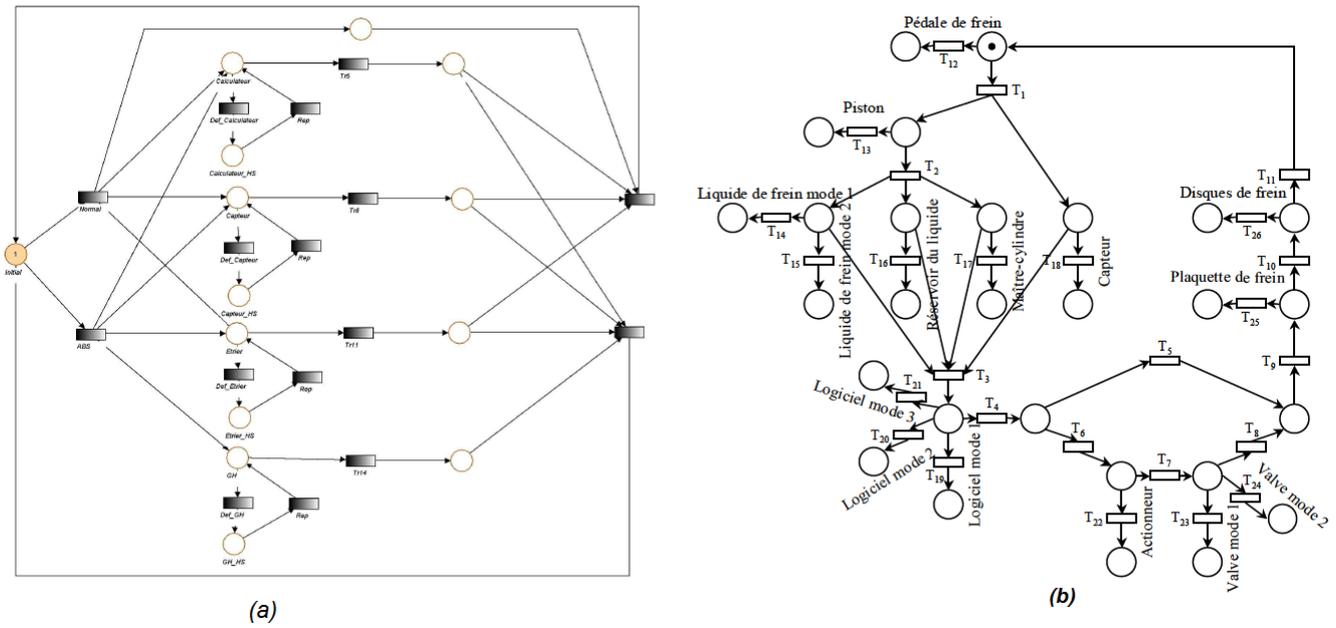


Figure 3.7: Modèle RdP du système ABS (a):[Demri, 2009a] et (b):[Mihalache, 2007]

Application 3: Systèmes photo voltaïques

Des études de fiabilité des systèmes photo-voltaïques ont été réalisées par [Laronde et al., 2010], par de la même démarche de modélisation à l'aide des RdP (Figure 3.8) et en prenant en compte plusieurs modes de défaillance pour chaque composant réparable. En outre, une étude de sensibilité des différents facteurs est réalisée, afin de mettre en évidence l'influence des données d'entrée sur la durée de vie et sur la fiabilité d'un module photo-voltaïque.

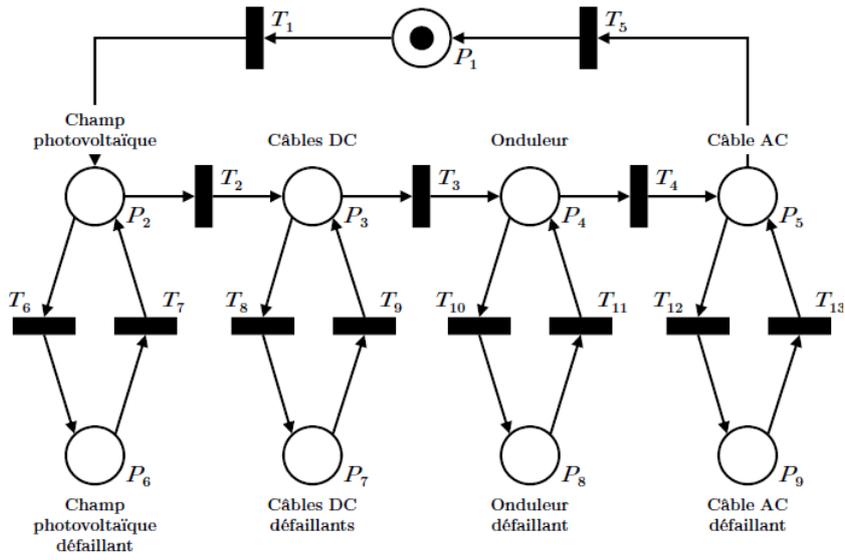


Figure 3.8: Modèle RdP d'un système photovoltaïque [Laronde et al., 2010]

L'utilisation des RdP a permis de modéliser les défaillances du système et de ses composants (modules PV) et les paramètres de la loi d'accélération (humidité). En ce qui concerne l'aspect reconfigurable, la

reconfiguration des modules du système photo-voltaïque (réorganisation des modules en série/parallèle), n'a pas apporté des différences importantes dans les évaluations de la disponibilité de chaque configuration.

3.5.3 Fiabilité mécatronique à l'aide de la matrice sémantique

Un nouveau concept [Coulibaly and Ostrosi, 2011] permet d'estimer la fiabilité globale d'un système mécatronique, en considérant séparément les composants mécaniques, électroniques et logiciels, à l'aide d'une décomposition structurelle et fonctionnelle multi-domaine appelée matrice sémantique. Cette proposition d'évaluation de la fiabilité est décrite par la figure 3.9. La matrice sémantique est un outil pour représenter la structure de systèmes multi-composants. C'est une matrice carrée (Table 3.1) qui donne une représentation simple, compacte et visuelle d'un système ou projet, statique ou dynamique (temporel). Coulibaly [Coulibaly and Ostrosi, 2011] a proposé un enrichissement de cette matrice 3.1 en ajoutant une nouvelle ligne qui contient le nombre de liens pour chaque composant, et autant de colonnes que de critères (criticité, fiabilité, impact sur l'environnement, etc.) 3.2.

Par exemple, en mécanique les critères traités comme le matériau, l'état de la surface, les traitements thermiques, le poids, le traitement de surface. En électronique, les critères traités comme le signal d'entrée, le signal de sortie, le nombre de surfaces, le nombre de composants insérés. Pour la partie logicielle, les relations internes, les données d'entrée, les données de sortie.

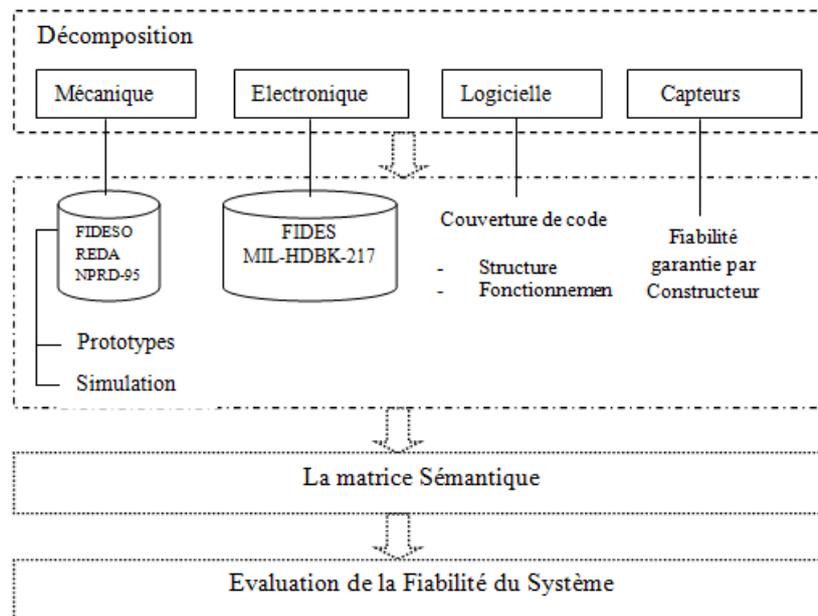


Figure 3.9: Matrice sémantique pour la fiabilité prévisionnelle d'un système mécatronique

La fiabilité de chaque composant est calculée de la manière suivante:

$$R(C_i) = R_{m\acute{e}canique} * R_{\acute{e}lectronique} * R_{logicielle} \quad (3.3)$$

Cette méthodologie a été appliquée sur le système "Disque Dur", système composé d'éléments mécaniques (bras, moteur de broche, moteur de bras), électroniques (carte de contrôle électronique, interface)

	Composants		
	$C_{mecanique}$	$C_{electronique}$	$C_{logiciel}$
Éléments <i>Mecaniques</i>	$C_{mecanique}$	$C_{mecanique}$	$C_{mecanique}$
Éléments <i>Electriques</i>	1	$R_{electronique}$	$R_{electronique}$
Modules logiciels	1	1	$R_{logiciel}$

Table 3.1: Matrice sémantique selon les technologies

Critères par composant	C1	C2	C3	...	Cn	Criticité	Fiabilité
C1	Classe 1	L_{n_2}		...	L_{1_n}	k_1	r_1
C2	Classe 2	..	..	..	L_{2_n}	k_1	r_2
C3	..	..	..	..	..	..	..
...	+
Cn		L_n	..	..	Classe n	k_1	r_n
Nombre des liaisons	d1	d2	..	..	dn	K_{tot}	r_{tot}

Table 3.2: Matrice sémantique selon les critères

et d'une partie logicielle pour contrôler les opérations internes et les communications avec le processeur externe.

La classification selon la technologie des composants utilisée dans cette approche néglige les interactions dysfonctionnelles entre ces composants. La matrice sémantique peut être mieux exploitée en terme de modélisation des interactions multi-domaine et l'utilisation des lois de probabilité de défaillance permettra d'estimer la dégradation spécifique de chaque composant. Cependant le calcul de fiabilité ne prend pas en compte les aspects dynamique et hybride.

3.5.4 L'outil flux informationnel pour la fiabilité mécatronique

L'approche flux informationnel [El Hami and Pougnet, 2015], [Belhadaoui, 2011] fournit un ensemble de scénarios de dysfonctionnement, fondé sur un modèle dynamique basé sur des automates à états finis. Cette démarche consiste à évaluer la probabilité qu'une architecture matérielle du processeur exécute des instructions assembleur (Figure 3.10). Cette probabilité est calculée à partir des taux de défaillance d'exécution des instructions logicielles sur une architecture matérielle.

Suite à l'AMDEC, l'architecture est représentée par deux modèles hiérarchisés (haut niveau et bas niveau) générés par une classification des modes de défaillance selon leurs natures, leurs degrés de criticité et leurs impacts sur l'architecture globale. Cette modélisation permet de représenter tous les modes fonctionnels et dysfonctionnels de chaque composant. La génération de listes de caractéristiques via le modèle de bas niveau de manière exhaustive permet d'avoir les scénarios et les combinaisons d'erreur menant à un état de défaillance. Ces scénarios sont en réalité des coupes minimales [Belhadaoui et al., 2007]. La transformation de ces coupes en arbres de défaillance permet de quantifier les valeurs de probabilités de tous les modes de défaillance.

Dans ce modèle, plusieurs types de blocs représentent différentes entités fonctionnelles :

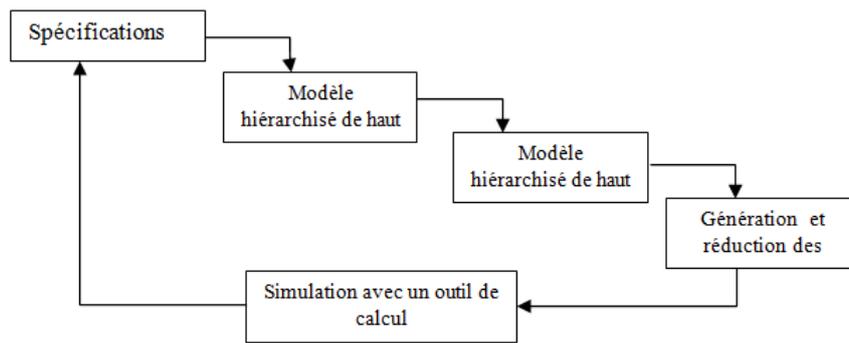


Figure 3.10: Démarche fiabiliste par l'approche flux informationnel

- WD : blocs pour les fonctions de contrôle,
- SRC : blocs pour les sources d'information,
- DEC : blocs pour les décisions logiques,
- ST : blocs pour toute autre fonction (stockage d'information, transformation d'information, self-tests ...)

La figure 3.11 présente deux exemples des modèles haut niveau et bas niveau.

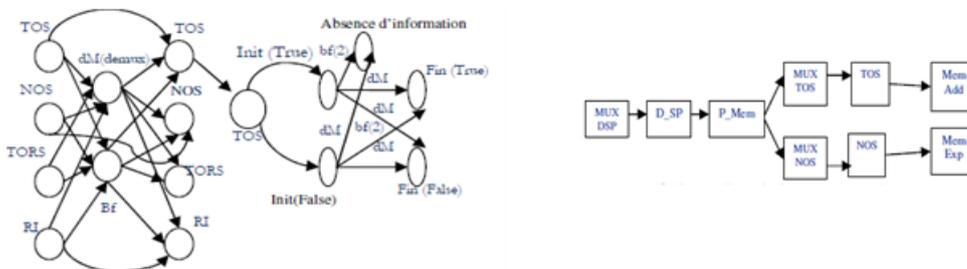


Figure 3.11: Exemple de modèle haut/bas niveau [Belhadaoui et al., 2007]

Cette démarche d'évaluation de la fiabilité basée sur l'approche «flux informationnel» permet de :

- Modéliser les comportements fonctionnels et dysfonctionnels avec la prise en compte des différents modes de défaillance (défaillances en valeur, défaillances temporelles, défaillances par arrêt, défaillances incohérentes) pour la partie analogique du système.
- Prendre en compte l'aspect dynamique hybride des systèmes embarqués et l'interaction logiciel/matériel de ces systèmes.
- Estimer la fiabilité et évaluer la sensibilité afin de connaître la contribution de chaque composant à la fiabilité du système.

3.5.5 Méthode holistique d'analyse de la fiabilité mécatronique

Une méthode basée sur un modèle holistique pour l'analyse de la fiabilité des systèmes mécatroniques a été proposée dans [Wedel and Göhner, 2006]. Il s'agit d'une extension de la méthode «modélisation et analyse qualitative basée sur la situation» (SQMA) [Gäng et al., 2007]. Celle-ci permet la description holistique de système mécatronique, et la décomposition hiérarchique en composants de technologies différentes. Cette méthode permet de modéliser l'échange d'information, les quantités physiques telles que la transmission d'énergie/flux de matériaux entre les composants et les interventions humaines comme le représente la figure ??.

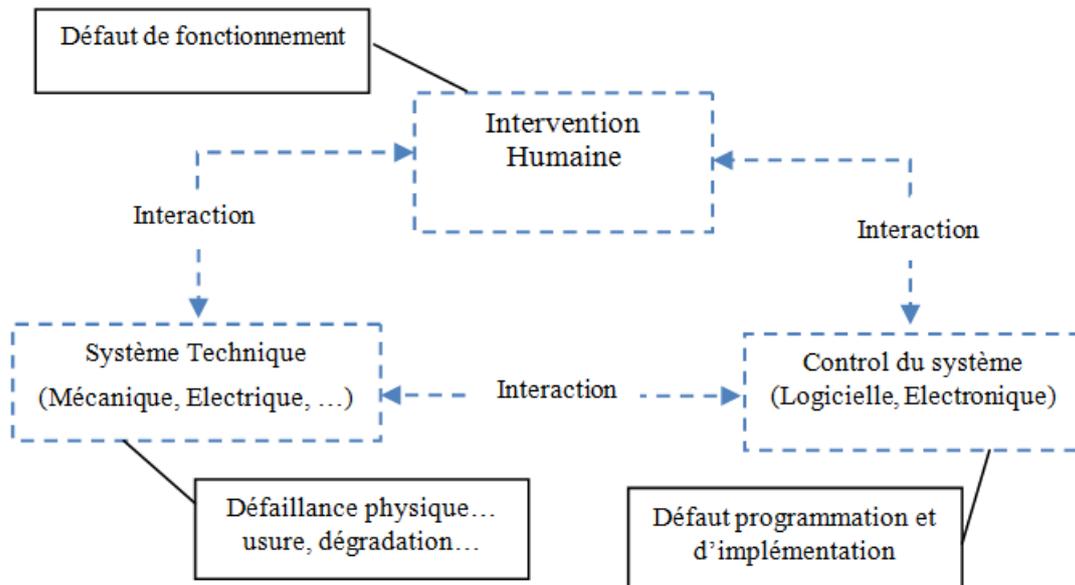


Figure 3.12: Les interactions multi-domaines d'un système mécatronique

L'approche propose plusieurs types d'interactions. L'interaction partie contrôle/système technique est l'interaction entre la partie logicielle et la partie matérielle, traitée également dans les travaux de [Belhadaoui et al., 2006]. L'interaction partie contrôle/facteur humain et l'interaction système technique/facteur humain permettent de montrer que la majorité des défaillances des logiciels sont provoquées par des erreurs humaines. Comme la partie logicielle est souvent modélisée par le langage UML (Unified Modeling Language), un traducteur pour les modèles d'UML vers SQMA a été développé.

3.5.6 Propagation de défaillance dans un système mécatronique

La propagation des défaillances dans un système mécatronique est traitée dans [Priesterjahn et al., 2011]. La propagation des défaillances pour l'ensemble du système est définie comme une combinaison des modèles de propagation des défaillances de tous les composants et connecteurs.

L'approche globale est mise en oeuvre en plusieurs étapes.

- Spécification de l'architecture des composants, des ports et des connecteurs qui relient ces ports, en utilisant des diagrammes de blocs internes de SysML ;

- Détermination des défauts et construction d'un modèle de propagation des défaillances (arbre de défaillances) ;
- Modélisation de la propagation des défaillances des connecteurs.

L'analyse de la propagation des défaillances dans un système mécatronique est basée sur la représentation markovienne du flux de contrôle, utilisant la méthode UML. L'approche a été appliquée au "Air Gap Adjustment System" (AGAS), en traitant notamment les défaillances liées aux connecteurs de différents types.

- Connecteurs physiques (réels) : les câbles, les tubes, les courroies, etc. Par exemple, une courroie peut être usée et transférer moins d'énergie que prévu ou un tube (qui transporte un liquide ou un gaz) peut présenter une fuite, etc.
- Connecteurs virtuels (wifi) : si les signaux transportés par Wifi sont perdus, la connexion est interrompue et provoque une erreur de service.

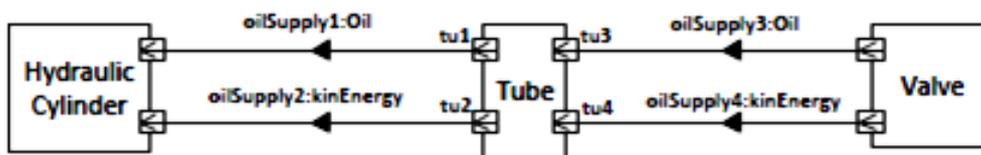


Figure 3.13: Modèle SysML d'un connecteur physique "tube"

La figure 3.13 montre une partie du AGAS où l'huile s'écoule de la soupape vers le vérin hydraulique. Le tube qui relie ces composants dans le système physique est modélisé comme un composant séparé. Ce dernier peut être défaillant ; par exemple, en raison de l'usure, il peut perdre de l'huile, provoquant une diminution du débit.

3.5.7 Approche par Réseau Bayésien de la fiabilité mécatronique

L'utilisation des réseaux Bayésiens pour l'évaluation de la fiabilité des systèmes complexes est présentée dans de nombreux travaux [Guérin et al., 2003], [Weber and Jouffe, 2003] ; pour la fiabilité des systèmes mécatroniques dans [Dorociak, 2012], [Zhong et al., 2010]. Un des intérêts des réseaux Bayésiens (RB) dans l'évaluation de la fiabilité est la prise en compte des incertitudes [Weber et al., 2012]. Un autre avantage important par rapport aux approches traditionnelles est l'inférence des informations provenant de plusieurs sources. Le modèle RB peut être construit à partir de l'AdD et les données existantes peuvent être facilement incorporées dans le modèle.

X. Zhong [Zhong et al., 2010] a développé une approche basée sur les réseaux bayésiens dont l'objectif est de prendre en compte l'incertitude des paramètres d'un modèle de fiabilité. Pour les systèmes mécatroniques, cette méthode d'évaluation de la fiabilité utilise les RB pour modéliser les paramètres de défaillance des éléments du système et leur dépendance. Le modèle permet d'estimer le taux de défaillance sous forme

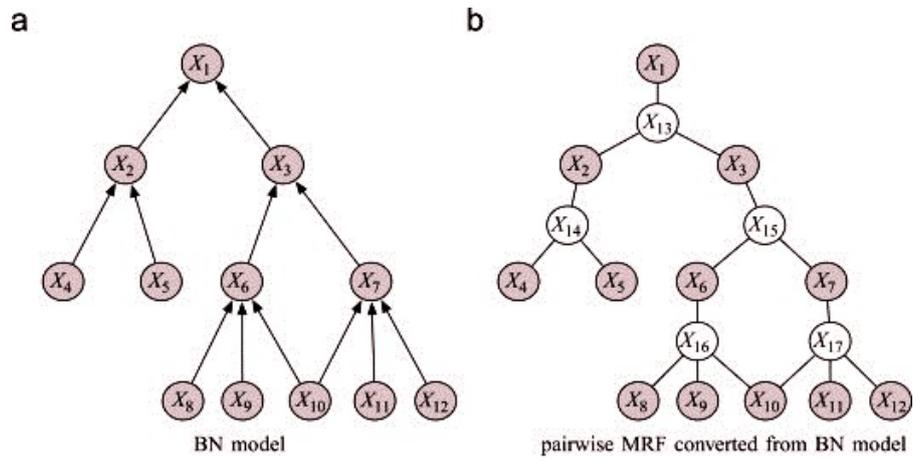


Figure 3.14: Modèle Réseau Bayésien du système de suspension

de distributions dont l'écart type peut être estimé à partir d'échantillons. Plusieurs types de distributions paramétriques, asymétriques et de nature stochastique peuvent être utilisées.

L'inférence d'approximation du modèle RB continu est réalisée par une version modifiée, en intégrant un algorithme de propagation de croyance non paramétrique (NBP) et en utilisant la densité marginale a posteriori de chaque paramètre du modèle. Le modèle RB prend en compte les incertitudes liées aux paramètres et peut être utilisé également pour d'autres analyses, telles que l'analyse de sensibilité ou l'analyse de diagnostic. Cette approche a été appliquée au "système de suspension active" pour véhicule.

3.5.8 Modèle de Cox pour la prédiction de la fiabilité mécatronique

Sébastien B. [Bobrowski et al., 2013] a développé une nouvelle approche (Figure 3.15) qui adopte et teste des modèles de régression pour prédire la fiabilité d'un système mécatronique. Cette démarche est basée sur des modèles de régression (modèle de Cox). La fiabilité d'un système est exprimée par:

$$F(t) = 1 - \exp\left(-\int_0^t \lambda(s) ds\right) \tag{3.4}$$

Le taux de défaillance proportionnel est estimé par l'introduction des co-facteurs représentant l'influence de l'environnement :

$$\lambda_i(t) = \lambda_0 * R_i(t) * \exp(\beta Y + \dots + \beta Y) \tag{3.5}$$

où R_i est l'indicateur de risque et $\beta^T = \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ est le vecteur des paramètres de régression inconnus. La fonction de risque de référence λ_0 et les paramètres de régression sont estimés statistiquement à partir des données de durée de vie issues d'une expérimentation. Ce modèle permet de prendre en compte plusieurs variables pour expliquer la durée de vie des mécanismes testés, sans donner de forme précise aux fonctions de fiabilité. Il est à noter que le paramétrage est entièrement statistique, il n'y a pas l'obligation de connaître et d'expliquer les phénomènes physiques. L'originalité de la méthode l'utilisation des outils pour le pronostic afin de prédire statistiquement le comportement des systèmes mécatroniques pour des valeurs non testées des facteurs influents.

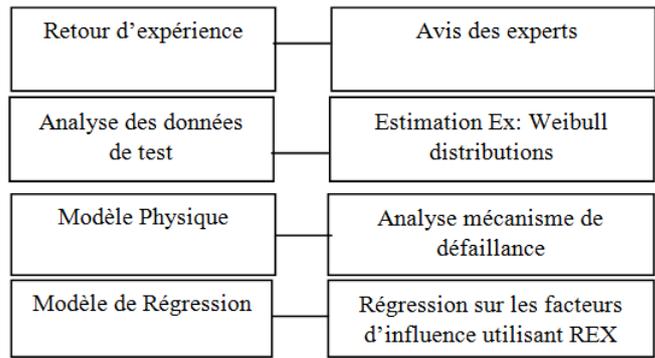


Figure 3.15: Modèle de Cox pour la fiabilité mécatronique

Le modèle de Cox a été utilisé pour l'ensemble de données de moteurs à courant continu et de transmissions planétaires. Les niveaux de charge sont associés aux 5 covariables, dont une est le couple de charge, les autres étant des variables indicatrices décrivant le type de moteur.

3.5.9 Utilisation des Bond Graph et de l'AMDEC pour l'évaluation de la fiabilité

Dans le but d'évaluer la fiabilité des éoliennes, [Mo and Chan, 2017] ont proposé une nouvelle méthode de détermination des défauts dans des conditions de fonctionnement défavorables, en utilisant un modèle Bond Graph et l'AMDEC afin de simuler les effets des stratégies de maintenance sur le temps moyen de défaillance des composants. L'utilisation de Bond Graph 3.16 permet de relier le flux d'énergie dans le système au taux d'utilisation de composants spécifiques.

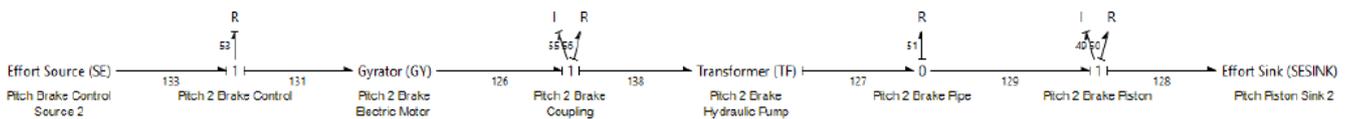


Figure 3.16: Modèle Bond Graph de la commande du système de freinage des pales d'éolienne

Quand l'éolienne génère d'énergie, l'utilisation du système est plus importante, augmentant l'usure, la fatigue, la détérioration due à l'élévation de la température, etc. Le modèle Bond Graph représente le transfert d'énergie dynamique bidirectionnel entre les composants (flux/efforts) ; par exemple, le vent fort qui force plus d'énergie à circuler à travers les composants de l'éolienne. Lorsque l'énergie maximale limite est atteinte, le composant est défaillant ; le temps moyen de défaillance et la fiabilité sont alors estimés par simulation. L'AMDEC de la turbine de l'éolienne a été réalisée sous le simulateur MADE. Le fonctionnement du modèle a été simulé pour une durée de 20 ans et un taux d'utilisation de 60% à 70%.

Les résultats de la simulation sont présentés sous forme de temps moyen de défaillance pour chaque composant. Cette approche permet de traiter également la propagation des défaillances aux autres composants ; par exemple, la simulation de la charge élevée de vent montre le chemin de propagation des défaillances à travers le système.

3.5.10 Démarche d'évaluation de la fiabilité d'un système mécatronique interactif

Le travaux sur l'évaluation de la fiabilité à l'aide du modèle Bond Graph traitent l'aspect dynamique hybride des systèmes mécatroniques, mais ne prennent pas en compte les aspects interactif et reconfigurable. D'autres approches [Mihalache, 2007], [Demri et al., 2007] ont permis d'observer que la fiabilité d'un système estimée à partir des fiabilités des composants est meilleure que la fiabilité estimée du système global ; cette différence est due aux interactions entre les composants. Le traitement des interaction multi-domaine (multi-technologies) reste un verrou scientifique pour les chercheurs et les industriels. Dans des travaux récents, [Habchi and Barthod, 2016] proposent une nouvelle méthodologie d'estimation de la fiabilité (Figure 3.17).

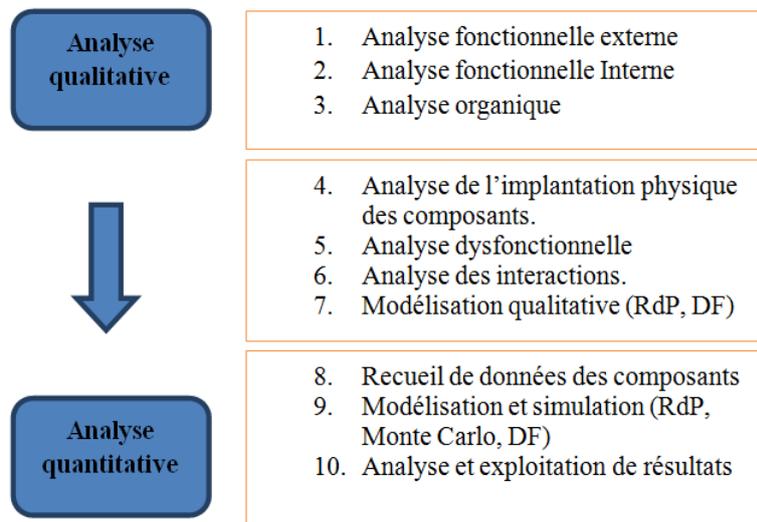


Figure 3.17: Méthodologie d'estimation de la fiabilité d'un système mécatronique avec M-interaction

Habchi introduit la notion d'analyse organique, qui permet de définir l'architecture du système avec l'ensemble des organes et composants et de leurs interfaces pour répondre aux fonctions techniques attendues. Les deux principales étapes d'une analyse organique sont :

- Constitution de la matrice fonctions/composants permettant de reporter les interactions fonctionnelles listées au niveau système et au niveau de chaque composant, par regroupement en organes ;
- Analyse des interactions organe/organe pour déterminer les interactions entre les différents organes constituants d'une architecture primaire issue de l'analyse morphologique.

La méthodologie a été appliquée sur un système mécatronique, «l'actionneur Intelligent», en prenant en considération deux cas possibles (présence ou absence d'interaction) et le fait que les interactions ont un impact et une continuité temporels. La démarche ne représente pas la dynamique des interactions multi-technologies et ne prend pas en compte l'aspect reconfigurable.

3.6 Synthèse

La table 3.3 présente une synthèse des différentes approches et des critères pris en considération.

Critères	Auteurs													
	[Khalifaoui, 2003]	[Schoenig et al., 2006]	[Bobrowski et al., 2013]	[Gäng et al., 2007]	[Priesterjahn et al., 2011]	[Zhong et al., 2010]	[Barreau et al., 2004]	[Guérin et al., 2009]	[Belhadaoui, 2011]	[Mihalache, 2007]	[Demri, 2009b]	[Habchi and Barthod, 2016]	[Mo and Chan, 2017]	[Coulbaly and Ostrosi, 2011]
Aspect Dynamique	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	+
Aspect Hybride	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-
Interaction Multi-domaine	-	-	-	-	-	-	-	-	+/-	-	-	+	-	-
Aspect Reconfigurable	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+/-	-	-	-	-
Propagation de défaillance	-	-	-	-	-	-	-	-	+/-	-	-	-	+	-
Profil de Mission	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-
Incertitudes de paramètre	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
Incertitudes de modèle	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Facteur d'influence	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
Mode commun de défaillance	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

+ : Traité ; - : Non traité ; +/- : Partiellement traité

Table 3.3: Synthèse des travaux sur l'évaluation de la fiabilité mécatronique selon les aspects

La synthèse montre que les aspects dynamique et hybride sont traités en phase de développement des systèmes mécatroniques dans la majorité des travaux. En revanche, les aspects interactif et reconfigurable sont peu abordés et restent un verrou scientifique. La prise en compte des incertitudes épistémiques (modèle et paramètres) est également une voie intéressante pour nos travaux.

Modèles	Auteurs													
	[Khalfaoui, 2003]	[Schoenig et al., 2006]	[Bobrowski et al., 2013]	[Gäng et al., 2007]	[Priesterjahn et al., 2011]	[Zhong et al., 2010]	[Barreau et al., 2004]	[Guérin et al., 2009]	[Belhadaoui, 2011]	[Mihalache, 2007]	[Demri, 2009b]	[Habchi and Barthod, 2016]	[Mo and Chan, 2017]	[Coulibaly and Ostrosi, 2011]
Arbre de défaillance	+	-	-	+	-	+	+	+	-	-	-	-	-	+
Diagramme de Fiabilité	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	-	+	-	+
Réseau de Pétri	+	+	-	-	-	-	+	+	-	+	+	+	-	-
Réseau Bayésien	-	-	-	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-
Chaîne de Markov	-	+	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-
Fonction de croyance	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Monte Carlo	+	+	-	-	-	-	+	+	-	+	+	+	-	-
UML	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-
Bond Graph	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-
Flux informationnel	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-
mécano-fiabiliste PHI2	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-
Modèle de Cox	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

+ : Traité ; - : Non traité

Table 3.4: Synthèse des modèles dans les travaux de fiabilité mécatronique

Une étude comparative de la fréquence d'application des différents outils de modélisation pour l'évaluation de la fiabilité, 3.4 montre que les Réseaux de Pétri (RdP) sont beaucoup utilisés dans l'évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques et que les fonctions de croyance ne sont pas utilisées, alors qu'elles le sont dans l'évaluation de la fiabilité des systèmes complexes.

3.7 Conclusion

Nous avons présenté les différentes méthodes d'évaluation de la fiabilité des composants pour chaque technologie (mécanique, électronique, informatique) utilisée dans les systèmes mécatroniques et les outils d'évaluation de la fiabilité des systèmes selon chaque aspect (dynamique, hybride, Interactif, reconfigurable). Par la suite, nous avons élaboré une lecture critique sur les principales contributions des travaux bien focalisés sur l'évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques en cours de développement (lève vitre de voiture, freinage ABS, Stabilité ESP, Disque dur, Capteur Intelligent, suspension, Éolienne, etc.), cela a été fait à partir des plusieurs méthodes (Arbre de défaillance, Diagramme de Fiabilité, Réseau de Pétri, Chaîne de Markov Réseau Bayésien, Monte Carlo, UML, Flux informationnel, couplage mécano-fiabiliste, etc.).

Cet état de l'art [Amrani et al., 2016b] montre que, si les aspects hybride et dynamique sont abordés dans plusieurs travaux, le traitement des interactions multi-domaines et de l'aspect reconfigurable reste un verrou scientifique et technologique. L'étude comparative des différents travaux nous montre l'absence d'une démarche prenant en compte tous les aspects et l'intérêt de proposer un modèle pouvant représenter et traiter l'ensemble des aspects d'un système mécatronique. Nous commencerons par nous intéresser aux interactions multi-technologies. Les réseaux Bayésiens dynamiques et les réseaux de Pétri sont les outils les plus adaptés à cette problématique.

Nous signalons également que la prise en compte des incertitudes épistémiques (de modèle et de paramètres) lors d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle est peu traitée dans la bibliographie qui sera l'objet d'une deuxième contribution au chapitre 4.

Évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques avec la prise en compte des interactions multi-domaines

4.1 Introduction

Nous avons présenté dans le chapitre précédent un état des lieux sur les méthodes et les outils d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques en phase de conception, en mettant en évidence les points suivants :

- L'aspect dynamique hybride dans l'évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques a été abordé dans plusieurs travaux [Khalifaoui, 2003], [Barreau et al., 2004], [MIHALACHE et al., 2012];
- Les interactions multi-domaines (mécanique, électronique et logiciel) lors de dysfonctionnements des composants représentent un verrou scientifique et technologique ;
- Le changement dynamique de configuration des systèmes mécatroniques rend la modélisation prévisionnelle de la fiabilité plus complexe et les méthodes classiques trouvent leurs limites ;
- Les méthodes probabilistes ne prennent pas en compte les incertitudes épistémiques (de modèle et de paramètres) lors d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle ;
- Plusieurs modèles (CM, RdP, RB) ont été utilisés pour l'évaluation de fiabilité mécatronique. Il serait intéressant de déterminer quel est le modèle le plus adapté pour représenter tous les aspects fonctionnels et les incertitudes.

La conception d'un système mécatronique entraîne une intégration de composants de technologies différentes, nécessitant, dès le début de l'étude, un travail collaboratif des différents acteurs du développement. L'évaluation de la fiabilité d'un tel système nécessite la connaissance de tous les mécanismes de défaillance des composants, pour chaque technologie intégrée dans le système et des lois de fiabilité associées. La difficulté principale réside dans la pluridisciplinarité se traduisant par des modélisations distinctes et ne permettant pas un développement intégré. Pourtant, il est nécessaire de disposer d'une démarche permettant de prévoir la fiabilité du système mécatronique. L'objectif de ce chapitre est de présenter une méthodologie originale d'évaluation de fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques, adaptée à l'aspect dynamique hybride et surtout capable de modéliser l'aspect interactif.

La première partie expose la problématique des interactions multi-domaines dans la défaillance ou la dégradation des composants et notre proposition pour modéliser ces interactions. Nous proposerons une méthodologie d'évaluation de fiabilité à l'aide de deux outils de modélisation et d'analyse, les réseaux de Petri et les réseaux Bayésiens. Les deux approches sont appliquées à l'«actionneur intelligent».

4.2 Problématique de l'interaction multi-domaines

Au cours des dernières décennies, les interactions multi-domaines ont été identifiées dans plusieurs travaux [Khalfaoui, 2003], [Barreau et al., 2004], [Demri, 2009a], [MIHALACHE et al., 2012]. Les systèmes mécatroniques étant l'intégration de composants pluri-technologiques (mécanique, électronique, logiciel, contrôle), les interactions de ces composants ont une influence importante sur le comportement dysfonctionnel du système. Edgar Morin (1977, p. 51) définit l'interaction comme une action d'une structure sur une autre, «structure étant pris au sens de matière physique» ; autrement dit, les interactions sont des actions réciproques modifiant le comportement ou la nature des éléments, corps, objets, phénomènes en présence ou en influence. Dans le domaine industriel, ces interactions peuvent être de plusieurs types : fonctionnelles, dysfonctionnelles, physiques, pluridisciplinaires et entre le contrôle-commande et la partie physique. D'après [Demri, 2009a], le caractère interactif d'un système est défini par l'existence d'interactions physiques et/ou fonctionnelles entre les composants du système. Nous avons identifié peu de travaux traitant des interactions multi-domaines (multi-technologies) lors de l'évaluation de la fiabilité prévisionnelle. [Aubry et al., 2012] distingue deux types d'interactions pluri-technologies :

- Les interactions entre un processus physique (pressurisation, chauffage, échange de chaleur, ...) et sa commande,
- Les interactions entre les composants logiciels et matériels, dues à la présence de réseaux de communication, de traitements de type multitâches, multiplexage au sein de la commande.

Selon [Khalfaoui, 2003], les interactions partagent la même variable continue pour plusieurs modules. Cette variable est probablement affectée par l'occurrence d'une défaillance dans un des composants du système, et ce partage causerait la défaillance d'un autre composant. Selon A. Demri [Demri, 2009a], l'interaction est la relation entre les constituants qui se traduit le plus souvent dans les systèmes complexes par un rapport d'influence ou d'échange portant aussi bien sur des flux de matière, d'énergie et/ou

d'information. En mécanique, l'interaction se réduit alors à un jeu de forces. Belhadaoui [Belhadaoui, 2011] a traité l'interaction matériel/logiciel, qu'il a défini comme une couche logicielle exécutée sur l'architecture matérielle. Dans [Demri, 2009a], une étude de sensibilité montre que la fiabilité du système est moins importante que la fiabilité estimée à partir des fiabilités des composants qui le constituent, les interactions n'ayant pas été prises en compte.

4.3 Méthodologie proposée

Afin d'évaluer la fiabilité des systèmes mécatroniques dès la conception, nous proposons la méthodologie décrite dans la figure 4.1:

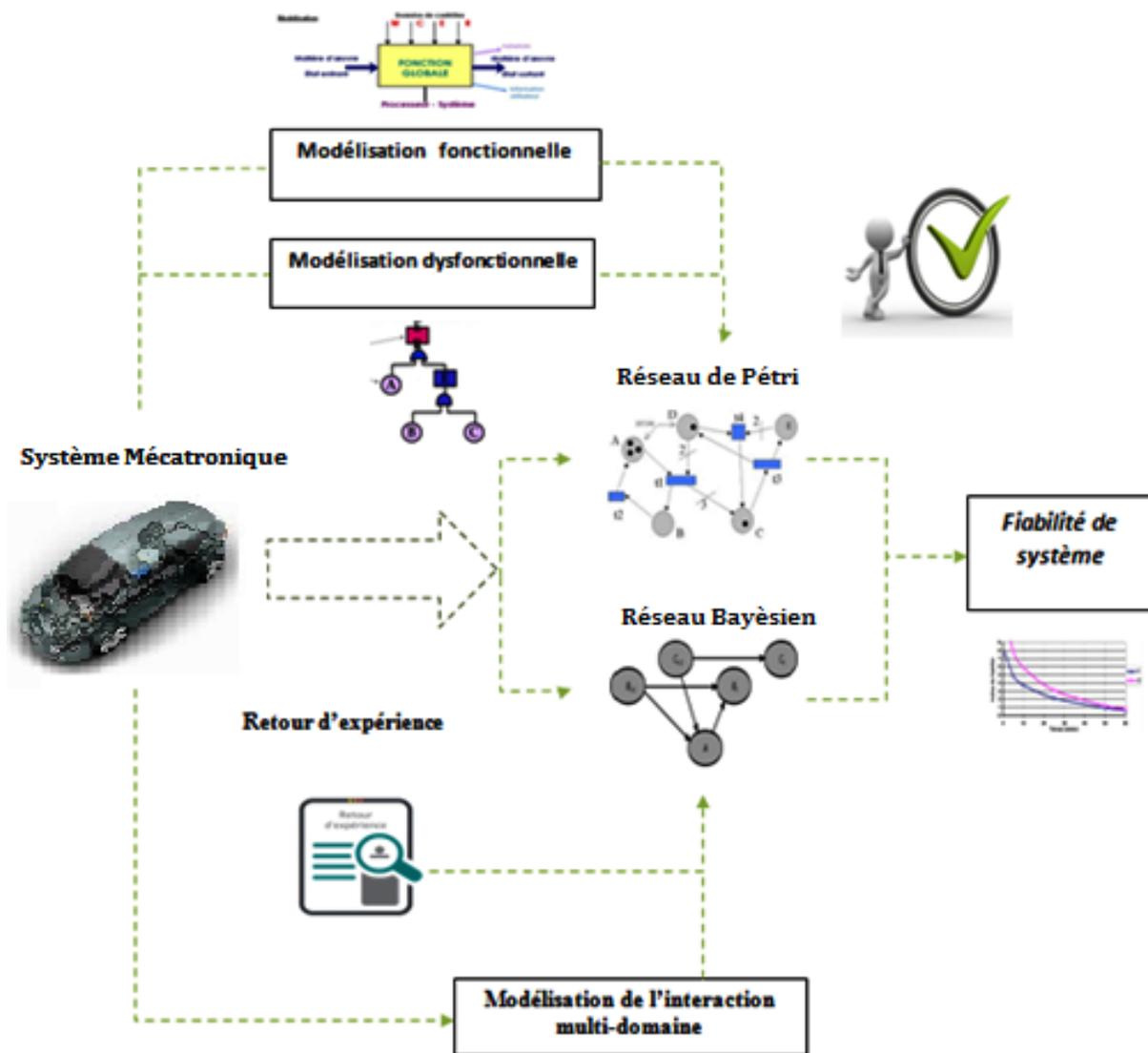


Figure 4.1: Méthodologie pour évaluer la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques

4.4 Modélisation qualitative

Le processus d'évaluation de la fiabilité comporte deux phases : l'étude qualitative (fonctionnelle et dysfonctionnelle) et l'étude quantitative.

4.4.1 Analyse fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle permet de décrire de manière synthétique les différentes fonctions et opérations réalisées par un système et ses modes de fonctionnement et de définir avec précision les limites matérielles du système et les diverses configurations d'exploitation possibles. Cette première phase s'effectue à l'aide d'outils d'analyse fonctionnelle ou de risque basés sur les connaissances, tels que :

- APTE: Application aux Techniques d'Entreprise,
- DS : Diagrammes de Succès,
- SADT : Structured Analysis and Design Technique,
- FAST : Fonction Analysis System Technique, etc.

L'Analyse Fonctionnelle Technique (A.F.T.) permet de faire la transition entre l'Analyse Fonctionnelle du Besoin (qui reste étrangère aux préoccupations d'ordre technologiques) et la conception détaillée, qui entre de plain pied dans les considérations technologiques. L'Analyse Fonctionnelle Technique est aussi appelée Analyse Fonctionnelle interne.

Plusieurs normes sont en vigueur concernant l'analyse fonctionnelle, on peut citer :

- NF X 50-100 : Analyse Fonctionnelle - Caractéristiques fondamentales - 1996.
- NF X 50-151 : Analyse de la Valeur, Analyse Fonctionnelle - Expression fonctionnelle du besoin et cahier des charges fonctionnel - 1991.
- FD X 50-101 : Analyse Fonctionnelle - L'Analyse Fonctionnelle outil interdisciplinaire de compétitivité - 1995.
- NF EN 1325-1 : Vocabulaire du Management par la Valeur, de l'Analyse de la Valeur et de l'Analyse Fonctionnelle - 1 : analyse de la valeur et Analyse Fonctionnelle - 1996

4.4.2 Analyse dysfonctionnelle

L'analyse dysfonctionnelle permet de déterminer et d'évaluer les défaillances du système. Parmi les méthodes qualitatives utilisées pour examiner les situations de dysfonctionnement des systèmes complexes, les plus connues sont l'AMDEC (Analyse des modes de défaillance de leur criticité) et les AdD (Arbre de Défaillances). Nous utiliserons l'AMDEC (figure 4.2) pour les parties mécanique, électrique et pneumatique et l'AEEL (Analyse des Effets des Erreurs de Logiciel, une adaptation de l'AMDE) pour la partie logicielle.

L'AMDEC permet d'identifier les causes des modes de défaillance les plus critiques et d'agir sur ces causes afin de diminuer le nombre de défaillances. Les objectifs d'une AMDEC sont :

AMDEC- Analyse des Modes de Défaillance de leurs Effets et de leurs Criticités						Service X			
Système:			Phase de fonctionnement :						
			Secteur:						
Composant	Fonction	Mode de défaillance	Cause	Effet	Détection	Criticité			
						G	P	D	C

Figure 4.2: Exemple d'AMDEC

- l'amélioration du système (objectif fiabilité),
- le diagnostic des défaillances (objectif maintenance),
- la maîtrise du fonctionnement (objectif performance attendue).

Pour chaque composant du système, les données de fiabilité sont précisées, soit à partir des bases de données existantes, soit à partir de l'avis d'experts pour les composants pour lesquels il n'y a aucune information précise.

La modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle prend en compte respectivement l'architecture du système mécatronique et les états de défaillance des composants. Le modèle fonctionnel et dysfonctionnel et le modèle stochastique, obtenu en associant les paramètres de fiabilité à chaque composant, constituent les entrées pour le modèle de fiabilité du système mécatronique.

4.5 Modélisation par les réseaux Bayésiens

Une des premières formalisations des Réseaux Bayésien a été faite par [Pearl, 2011] en 1985, en mettant en évidence trois aspects :

- la nature subjective des informations,
- l'utilisation de la règle de Bayes comme principe de base pour la mise à jour des informations,
- la distinction entre les modes de raisonnement causal et fondé.

Un réseau Bayésien est un modèle de représentation de la connaissance permettant de calculer des probabilités conditionnelles en utilisant le théorème de Bayes. Ce modèle a été proposé dans le domaine de l'intelligence artificielle, mais son utilisation a été rapidement étendue aux autres domaines scientifiques, en particulier dans le domaine de sûreté de fonctionnement, pour la gestion des événements incertains, la détection et le diagnostic des défaillances des systèmes, etc. Au cours de ces dernières années, les travaux sur les réseaux Bayésiens portent principalement sur trois points essentiels : les algorithmes d'inférence, l'apprentissage de la structure du réseau et l'apprentissage des paramètres du réseau.

4.5.1 Définition des réseaux Bayésiens

Un réseau bayésien $B = G, P$ est défini par :

- un graphe orienté sans circuit $G = (X, E)$, où X est l'ensemble des noeuds (ou sommets) et E est l'ensemble des arcs,
- un espace probabilisé (Ω, P) ,
- un ensemble de variables aléatoires $X = X_1, \dots, X_n$, associées aux noeuds du graphe et définies sur (Ω, P) , telles que

$$P(X_1, \dots, X_n) = \prod_{k=1}^n P(X_k | Pa(X_k)) \quad (4.1)$$

où $Pa(X_i)$ est l'ensemble des parents du noeud X_i dans G .

Un réseau Bayésien (RB) est un modèle graphique probabiliste qui permet de calculer des probabilités conditionnelles des variables aléatoires structurées en un graphe orienté acyclique G, P , où G est un DAG (Directed Acyclic Graph) et P une collection de distributions de probabilités conditionnelles pour chaque variable aléatoire associée aux sommets du graphe.

Cette méthode permet de quantifier les interactions entre l'état d'un système et la valeur de ses variables fonctionnelles, en utilisant la formule d'inversion de Thomas Bayes (1764) (loi de Bayes), pour toute hypothèse X et toute observation :

$$P(X/Y) = P(Y|X) \frac{P(X)}{P(Y)} \quad (4.2)$$

Cette loi peut être réécrite pour mettre en évidence une proportionnalité :

$$Probabilitaposteriori \propto Vraisemblance * Probabilitapriori \quad (4.3)$$

L'arc entre deux variables montre une dépendance directe entre ces deux variables : l'une est le parent et l'autre l'enfant. Le comportement de la variable enfant est déterminé à partir du comportement de son ou ses parents, comme indiqué dans la figure 4.3. A chaque nœud du réseau est associée une table de probabilités conditionnelles, qui permet de quantifier l'effet du ou des nœuds parents sur le nœud enfant : elle écrit les probabilités associées aux nœuds enfants en fonction des différentes valeurs des nœuds parents. Pour les nœuds racines (sans parents), la table de probabilité n'est plus conditionnelle et fixe alors des probabilités a priori des valeurs de la variable.

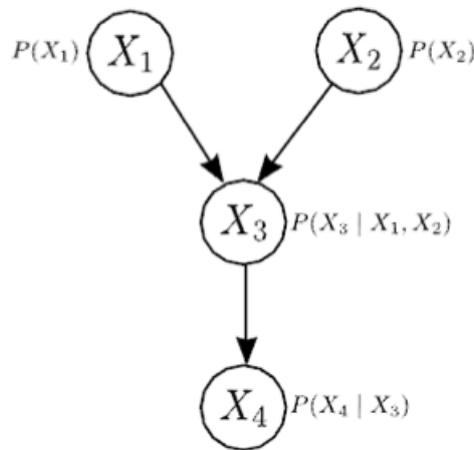


Figure 4.3: Exemple de réseau Bayésien

Les probabilités à priori : Les variables d'entrée du modèle ont des valeurs de probabilités a priori, renseignées à partir d'avis d'experts ou à partir du retour d'expérience. **Les probabilités conditionnelles** : À chaque variable intermédiaire est associée une table de probabilités conditionnelles, renseignées à partir d'avis d'experts ou à partir du retour d'expérience. **Les probabilités à posteriori** : Les probabilités a posteriori sont calculées à l'aide du théorème de Bayes.

La mise en œuvre de cet outil se fait par la détermination de la table des probabilités conditionnelles (CPT: Conditional Proportional Table) pour les nœuds qui correspondent aux composants du système et pour les nœuds «ET/OU» qui représentent la relation logique entre ceux-ci. Une probabilité est affectée à chaque état du nœud. Cette probabilité est définie, a priori, pour un nœud racine et calculée par inférence pour les autres. Le calcul est basé sur les probabilités des états parents et sur la table de probabilité conditionnelle. Par exemple, le réseau bayésien de la figure 4.3 est composé des nœuds X_1 , X_2 , X_3 et X_4 , qui ont chacun deux états (UP et Down). Les probabilités du nœud source X_1 sont définies dans la table 4.1.

Les probabilités de chaque état du nœud Y sont calculées à l'aide de la table de probabilités conditionnelles. La table 4.2 définit la probabilité de l'état de Y en connaissant l'état de X.

Plusieurs extensions des réseaux bayésiens ont été proposées pour des applications spécifiques [Mrad, 2015]

:

- L'ajout de l'aspect temporel (réseaux bayésiens dynamiques),

X_1	
Up	Down
$P(X_1 = Up)$	$P(X_1 = Down)$

Table 4.1: Table des probabilités a priori du nœud source X_1

	X_3	
X_1	Up	Down
Up	$P(X_3 = Up/X_1 = Up)$	$P(X_3 = Down/X_1 = Up)$
Down	$P(X_3 = Up/X_1 = Down)$	$P(X_3 = Down/X_1 = Down)$

Table 4.2: Table de probabilités conditionnelles de nœud X_3

- L'ajout de nœuds de décision et des nœuds d'utilité (diagrammes d'influence),
- La combinaison avec la notion d'objet (réseaux bayésiens orientés objets),
- La combinaison avec la théorie des ensembles flous (réseaux bayésiens flous),
- La division du réseau en plusieurs sous-réseaux qui seront gérés plus facilement localement (réseaux bayésiens distribués),
- La combinaison avec les fonctions de croyance (réseaux de croyance "Belief Network").

Nous présenterons brièvement quelques uns de ces modèles dans la suite du mémoire. Tous ces modèles utilisent les notions d'observation et d'inférence.

Pour nous, les extensions les plus intéressantes sont les réseaux bayésiens dynamiques qui se distinguent des réseaux bayésiens classiques dits statiques, et les réseaux de croyance qui seront utilisés pour le traitement des incertitudes dans le chapitre 5.

4.5.2 Réseau Bayésien Dynamique

Les réseaux bayésiens dynamiques (RBD) prennent en compte l'évolution des variables aléatoires, généralement dans le temps ; ils sont une extension des réseaux bayésiens dans laquelle l'évolution temporelle des variables est représentée.

Un réseau bayésien dynamique est composé d'une suite de tranches de temps, où chaque tranche contient un ensemble de variables représentant l'état de l'environnement pour ce laps de temps : X_{it} est l'état de la variable X_i à l'instant t et $X^t = X_{1t}, \dots, X_{pt}$ l'état de l'environnement. Chaque tranche est un réseau Bayésien (figure 4.5.2). La même structure de réseau est répliquée au fur et à mesure que le temps avance. La dynamique temporelle de l'environnement modélisé est représentée par des arcs reliant les différentes tranches entre elles. Chaque tranche peut contenir des nœuds d'observation qui modélisent l'effet des entrées du modèle sur l'état courant de l'environnement.

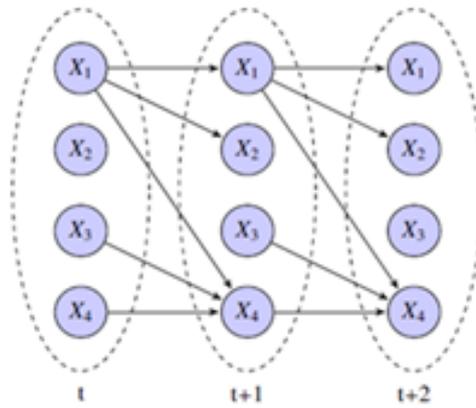


Figure 4.4: Exemple de réseau bayésien dynamique

L'inférence dans un RBD est le calcul de la distribution de probabilité des variables cachées à tout instant t , en connaissant les observations disponibles jusqu'à à l'instant t . En d'autres mots, il s'agit de prédire la distribution probabiliste pour les tranches de temps futures :

$Pr(X(t + dt)|X(i : t))$, où $X(i, t)$ représente la i^{me} variable cachée en t_0 .

Les réseaux Bayésiens dynamiques peuvent traiter des modèles complexes, notamment ceux pour les études de fiabilité.

4.5.3 Modélisation de la fiabilité par les réseaux bayésiens dynamiques

Les Réseaux Bayésiens Dynamiques (RBD) sont un outil mathématique intéressant pour modéliser la fiabilité des systèmes complexes. Les recherches actuelles portent sur des solutions de plus en plus efficaces pour traiter des modèles de plus en plus complexes et augmenter le nombre de variables prises en compte. L'utilisation des réseaux Bayésiens dans les études de sûreté de fonctionnement date des années 90 [Torres-Toledano and Sucar, 1998], avec la modélisation des diagrammes de fiabilité (RBD) par des réseaux Bayésiens. [Bobbio et al., 2001] propose la transformation des arbres de défaillances en réseau Bayesian, afin de modéliser la dépendance entre les composants d'un système. Les probabilités a priori des nœuds parents sont les probabilités des événements de base de l'Add. [Boudali and Dugan, 2005] montre que les réseaux Bayésiens dynamiques sont équivalents aux arbres de défaillance dynamiques.

Les méthodes d'évaluation de la fiabilité des systèmes, telles que les arbres de défaillances ou les diagrammes de fiabilité, sont basées sur des modèles statistiques paramétriques et non paramétriques des données de temps à défaillance et de leurs paramètres associés. Limitées par l'explosion combinatoire du nombre d'états, ces méthodes ne permettent pas de modéliser l'influence du temps et l'interdépendance entre les composants et ne gèrent pas des distributions statistiques non standard [Bobbio et al., 2001]. Le formalisme des réseaux Bayésiens dynamiques (RBD) est adapté à l'analyse de la fiabilité des systèmes complexes, notamment des systèmes mécatroniques, son aspect probabiliste permettant de modéliser également les interactions multi-domaines. Les RBD sont un outil graphique intuitif et compréhensible [Weber et al., 2012], qui permet de modéliser de manière efficace les lois de probabilités de l'ensemble des variables et d'observer le comportement du système dans des contextes qui ne peuvent pas être testés.

L'évaluation de la fiabilité dynamique à l'aide des réseaux Bayésiens dynamiques est présentée dans plusieurs travaux [Medina-Oliva et al., 2013], [Weber et al., 2012], [Weber and Jouffe, 2003] soulignant son l'efficacité de cet outil. Weber [Weber and Jouffe, 2006] a proposé un modèle Bayésien dynamique pour l'évaluation de la fiabilité des systèmes simples et une méthode de modélisation de la fiabilité des systèmes multi-états. [Medina-Oliva et al., 2013], [Weber et al., 2012] comparent les chaînes de Markov et les réseaux Bayésiens dynamiques comme outils pour l'évaluation de la fiabilité d'un système complexe. Un état d'art détaillé et exhaustif de l'application des réseaux Bayésiens à l'évaluation de la fiabilité peut être trouvé dans les travaux de [Langseth and Portinale, 2007]. Dans le domaine du logiciel, les réseaux Bayésiens ont été utilisés pour la prévision des fautes logicielles et pour estimer la fiabilité du logiciel. [Zhong et al., 2010] utilise les réseaux Bayésiens pour évaluer la fiabilité d'un système de suspension active des véhicules, avec la modélisation des paramètres de défaillance des éléments du système, de leur dépendance et avec la prise en compte de son aspect dynamique hybride. L'application de cet outil dans la quantification de la fiabilité est relativement récente [Weber et al., 2012], mais efficace par sa capacité à prendre en compte les probabilités de défaillance a priori des composants et à modéliser le vieillissement des composants en intégrant l'impact des opérations de maintenance et de l'évolution de l'environnement opérationnel des composants.

4.5.4 Exemple de réseau Bayésien sous "Hugin"

Plusieurs outils logiciels permettent la simulation d'un réseau Bayésien : Hugin, BNT toolbox Matlab, Baysia Lab, Netica, etc. Nous présentons un exemple de réseau Bayésien traité à l'aide du logiciel Hugin. Considérons un système de trois composants A, B et C, avec la structure fonctionnelle présentée figure 4.5. Chaque composant peut être dans deux états. Les probabilités de défaillance sont données dans la table 4.3.

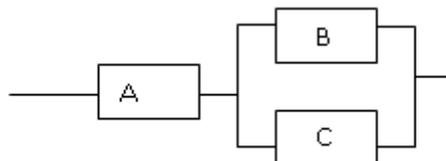


Figure 4.5: Schéma d'un système de trois composants

Probabilité	Composant A	Composant B	Composant C
P(Fonct)	0.93	0.97	0.85
P(Déf)	0.07	0.03	0.15

Table 4.3: Table de probabilités des composants A, B et C

La figure 4.6 présente le modèle réseau Bayésien construit avec le logiciel Hugin Lite 8.4 :

En représentant par ce réseau bayésien les dépendances entre les états des composants A, B et C et à partir de la simulation sous Hugin, la probabilité de défaillance du système est $P(\text{Défaillance}) = 0.54$.

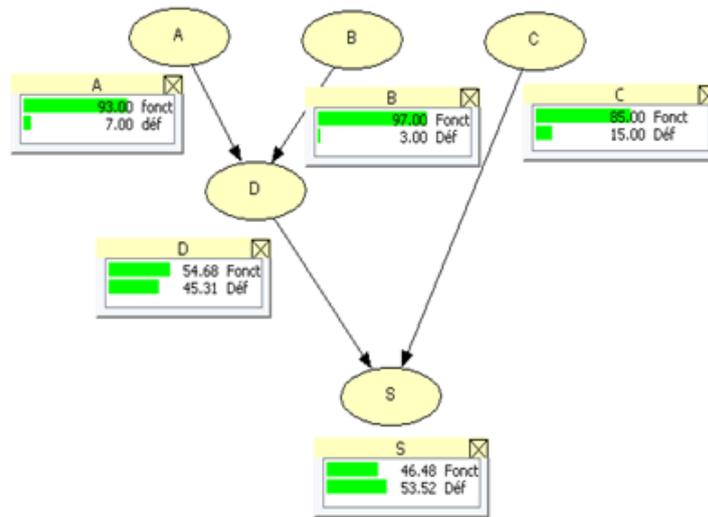


Figure 4.6: Modèle dysfonctionnel RB d'un système de trois composants

4.6 Modélisation quantitative par Réseaux de Petri

Les réseaux de Petri ont été inventés en 1962 par Carl Adam Petri [Brams, 1983]. Ils sont basés sur la théorie des automates. Ces réseaux permettent de représenter le comportement des systèmes dans les conditions de fonctionnement normal, ainsi que leur comportement en cas de défaillance de leurs composants.

Le principal avantage des réseaux de Petri est la possibilité d'analyser le comportement dynamique d'un système en présence de défaillances. Cette modélisation dynamique permet d'obtenir des mesures en termes de fiabilité [Dutuit et al., 1996]. Les RdP permettent de représenter dans un même modèle le fonctionnement d'un système et les occurrences de défaillances.

4.6.1 Définition des RdP

Les réseaux de Petri sont à la fois un formalisme mathématique et un langage graphique permettant de modéliser les systèmes complexes. Un RdP est un graphe biparti $G = (S, A)$ dans lequel S est l'ensemble des sommets (places et transitions) et A l'ensemble des arcs. On représente généralement les places par des cercles et les transitions par des barres ou des rectangles. Les arcs d'un réseau de Petri relient les transitions aux places ou les places aux transitions. Les places contiennent des jetons ou marques qui se déplacent de place en place en franchissant les transitions suivant une règle de franchissement.

Un réseau de Petri est défini par $\langle P, T, Pre, Post, M_0 \rangle$ tel que :

- P est un ensemble fini P_1, \dots, P_m de places;
- T est un ensemble fini t_1, \dots, t_m de transitions;
- M_0 est le marquage initial;
- $Pre : P \times T \rightarrow N$ est la fonction de précondition et $Post : P \times T \rightarrow N$ celle de postcondition. Ces fonctions définissent les relations d'incidence (les poids des arcs) existant entre les places et les

transitions. Pour une transition t , on note $Pre(t)$ et $Post(t)$ les ensembles des places en amont et en aval, respectivement.

La figure 4.7 suivante présente un exemple de réseau de Petri :

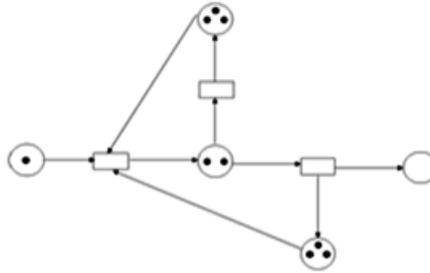


Figure 4.7: Exemple de réseau de Petri

4.6.2 Extensions des Réseaux de Petri

Depuis les années 70, les réseaux de Petri ont été enrichis par de nombreux auteurs, particulièrement en intégrant l'aspect temporel et stochastique dans le modèle initial. Les paragraphes suivants sont consacrés à la présentation de quelques extensions des réseaux de Petri.

Réseaux de Petri temporisés

Les réseaux de Petri temporisés [Khansa, 1997] introduisent la notion de temps dans le modèle, permettant de décrire un système à événements discrets dont le fonctionnement dépend du temps. Deux principales familles d'extension temporelle des réseaux de Petri ont été proposées : les réseaux de Petri temporisés et les réseaux de Petri temporels. Pour les réseaux de Petri temporisés, les temporisations sont associées aux transitions (T-temporisés) ou aux places (P-temporisés). La temporisation représente la durée minimale de franchissement ou le temps de séjour minimum d'un jeton dans une place.

Réseaux de Petri stochastiques

Les réseaux de Petri stochastiques ont été introduits par Florin [Daniel and Descotes-Genon, 1995] pour répondre à de problèmes d'évaluation de la sûreté de fonctionnement de systèmes informatiques. Ces problèmes faisant intervenir des phénomènes aléatoires, les transitions du réseau de Petri ont des durées de franchissement aléatoires, distribuées suivant une loi exponentielle. La distribution exponentielle permet d'exploiter les propriétés mathématiques d'un processus de Markov. Ce modèle stochastique est également utilisé pour la modélisation et l'analyse de performances des systèmes de production.

Réseaux de Petri stochastiques généralisés

Ces réseaux [Brams, 1983] comporte des transitions avec une temporisation nulle (transitions immédiates) et des transitions avec une temporisation aléatoire distribuée suivant une loi exponentielle (transitions

stochastiques). Le processus stochastique sous-jacent au graphe des marquages est un processus de Markov à temps continu.

Réseaux de Petri stochastiques et déterministes

Cette classe est une extension des réseaux de Petri stochastiques généralisés [Dutuit et al., 1996]. Le réseau comporte des transitions immédiates, des transitions à temporisations déterministes et des transitions à temporisations stochastiques distribuées suivant des lois exponentielles.

Réseaux de Pétri stochastiques étendus

Le réseau comporte uniquement de transitions temporisées aléatoires. Le temps est distribué suivant une loi quelconque [Dutuit et al., 1996]. Le processus stochastique sous-jacent au graphe des marquages est, avec quelques restrictions, un processus semi-markovien. Si les conditions ne sont pas remplies, le réseau de Petri stochastique étendu est résolu par des simulations à événements discrets.

Réseaux de Petri colorés

Les réseaux de Petri colorés [Alla, 1987] sont des réseaux de Petri dans lesquels les jetons portent des couleurs. Une couleur est une information associée à un jeton. Cette information permet de distinguer des jetons entre eux et peut être de type quelconque. Les réseaux colorés n'apportent pas de puissance de description supplémentaire par rapport aux réseaux de Petri classiques, ils permettent juste une condensation de l'information. A tout réseau de Petri coloré marqué correspond un réseau de Petri qui lui est isomorphe. Des extensions de type stochastique sont développées par de nombreux auteurs : les RdP Stochastiques Colorés et les RdP stochastiques généralisés colorés. Ce type de réseau de Petri est exploité essentiellement comme outil de simulation.

Réseaux de Petri continus et hybrides

Dans le cas de systèmes où le nombre de ressources est important et les durées opératoires sont variables dans le temps, une approximation continue des phénomènes et des variables est intéressante. Une modélisation continue considère les transferts d'entités comme des flux et remplace les variables discrètes par des variables continues. Un RdP continu (RdPC) [Daniel and Descotes-Genon, 1995] est composé de places continues et de transitions continues et son fonctionnement est lié à la notion de vitesses liées aux transitions, vitesses pouvant être constantes ou variables. Cette classe de réseaux de Petri a conduit à une autre classe, les réseaux de Pétri Hybrides. Un RdP hybride est une combinaison de la sémantique d'un RdP continu et de celle d'un RdP discret. Ils sont adaptés pour la modélisation des systèmes dynamiques hybrides.

4.6.3 Modélisation de la fiabilité par Réseaux de Petri

La modélisation de la fiabilité des systèmes à l'aide des réseaux de Petri stochastiques a été abordée par plusieurs auteurs [Khalifaoui, 2003] , [Demri, 2009a], [Mihalache, 2007], [Laronde et al., 2010], La mod-

élisation de la fiabilité des systèmes, réparables ou non, est réalisée par la modélisation des défaillances des composants à partir d'un arbre de défaillances [Sadou and Demmou, 2009]. Les réseaux de Petri permettent de :

- Modéliser le fonctionnement et le dysfonctionnement d'un système complexe et représenter l'aspect hybride et dynamique d'un système mécatronique ;
- Traiter les phénomènes stochastiques, parallèles et asynchrones ;
- Traiter les lois usuelles de la fiabilité (exponentielle, Weibull) à différents tirs à la sollicitation (Figure 4.8 ;
- Modéliser le système d'une manière hiérarchique, complète et cohérente.

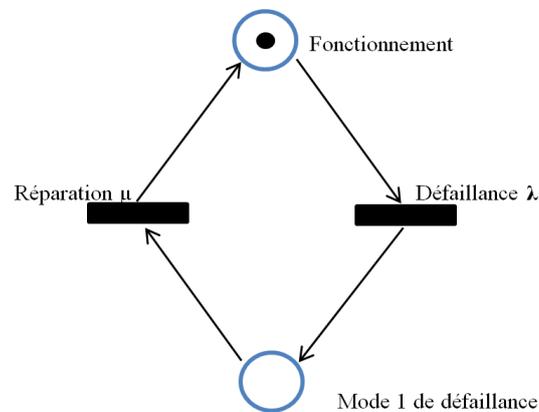


Figure 4.8: Modèle RdP de défaillance d'un composant réparable

Les réseaux de Petri à Prédicats Transitions Différentiels Stochastiques ont été utilisés dans [Mihalache et al., 2000] pour représenter les défaillances des composants de différentes technologies d'un système mécatronique. Le modèle comporte les deux parties : la partie fonctionnelle (modèle physique, à partir des équations différentielles d'évolution en fonction du temps) et la partie dysfonctionnelle (transitions de défaillances, suivant des lois de fiabilité ([Demri et al., 2007]).

Dans [Khalifaoui, 2003] le modèle RdP a été utilisé pour l'étude de sûreté de fonctionnement d'un système mécatronique, afin de déterminer des scénarios redoutés. Cependant, le modèle RdP utilisé ne permet pas de distinguer les états ou séquences affectant la fiabilité de ceux affectant la sécurité, ni de représenter quantitativement et avec précision les dépendances entre les défaillances.

Le modèle RdP est simulé à l'aide d'un logiciel, par exemple, GRIF ou Miss RDP. Des logiciels de modélisation peuvent représenter un modèle RdP : Alta Rica, Simulink/State flow Matlab, SURF 2, STAT-ECHART.

4.7 Modélisation des interactions multi-domaines

4.7.1 Modélisation qualitative

Dans une interaction multi-domaines, un composant défaillant influence un autre composant de technologie différente et l'interaction va influencer directement les valeurs du taux de défaillance du deuxième composant (4.9). Le calcul des taux de défaillance des composants influencés par ces interactions doit être fait à partir des lois d'accélération associées aux stress, en fonction de la variation de la valeur du stress.

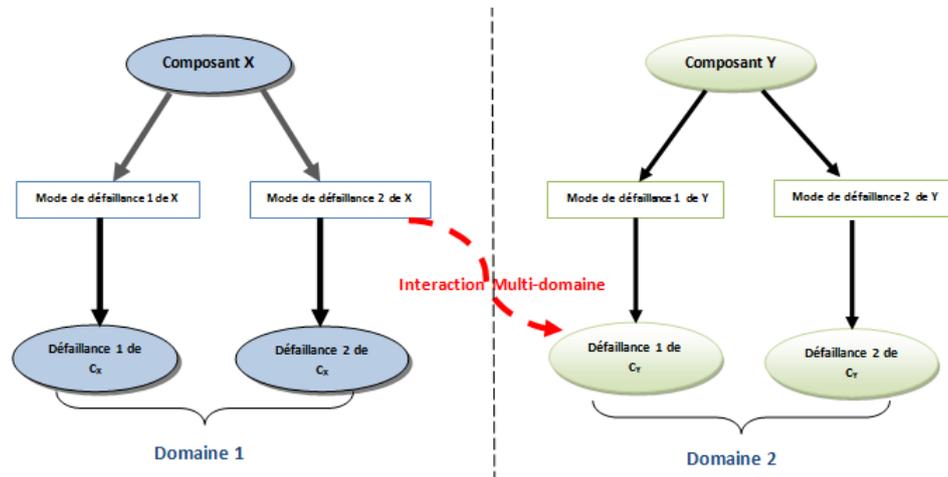


Figure 4.9: Présentation graphique des interactions multi-domaines

On définit l'interaction multi-domaines comme étant l'influence de la dégradation ou de la défaillance d'un composant d'une technologie (par exemple électrique ou électronique) sur le fonctionnement et la défaillance d'un autre composant d'un domaine différent (par exemple mécanique) [Amrani et al., 2016a]. Il s'agit d'une relation mutuelle cause/effet de dysfonctionnement, entre technologies différentes (mécanique, électronique, logiciel), constitutives du système mécatronique. Une interaction multi-domaines peut être définie comme une fonction d'influence entre deux composants de domaines différents (Figure 4.10). Il faut tenir compte de ces interactions dès la phase de conception, afin d'obtenir une estimation correcte de la fiabilité prévisionnelle du système mécatronique.

A partir du schéma présenté en Figure 4.9 les interactions sont définies comme une relation «cause/effet» d'un mécanisme de défaillance d'un composant, dans laquelle la cause (facteur d'influence) provient d'autres domaines (table 4.4) :

- Température,
- Vibrations, chocs,
- Surpression, Eau huile;
- Humidité,
- Surintensité, Surpression,
- Erreur de paramétrage.

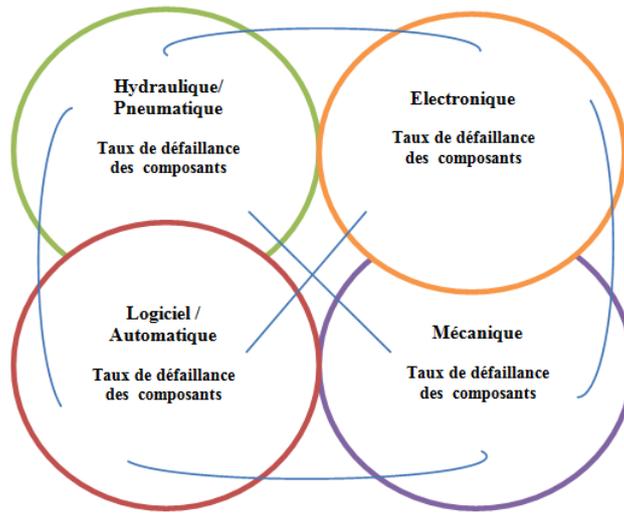


Figure 4.10: Modèle proposé pour les interactions

Les facteurs d’influence sont répertoriés à partir de l’AMDEC du système mécatronique. La table 4.4 présente des exemples de facteurs d’influence selon les technologies des composants d’un système.

[Brissaud et al., 2007], [Lyonnet et al., 2006] ont introduit les facteurs d’influence comme des éléments internes ou externes qui agissent sur la fiabilité du système. L’influence provoque une modification des taux de défaillance des composants du système. Ces facteurs peuvent être des facteurs de conception, des facteurs liés à la fabrication (comme les facteurs Process du guide FIDES), des facteurs liés à l’utilisation, des facteurs de maintenance, des facteurs humains et organisationnels. Nous proposons d’ajouter les interactions multi-domaines dans les systèmes mécatroniques comme des facteurs d’influence à prendre en compte.

Domaine	Électrique/Thermique	Hydraulique/Pneumatique	Automatique/logiciel
Mécanique	Température Vibration Chocs	Surpression Eau – huile- chocs Fuites	Erreur de paramètre
Électrique Thermique		Température Humidité	Surintensité Sur tension
Hydraulique Pneumatique			Surpression Erreur de paramètre

Table 4.4: Les interactions multi-domaines dans un système mécatronique

4.7.2 Modélisation quantitative

Dans la quantification à l’aide d’une loi d’accélération l’influence d’une interaction sur le taux de défaillance d’un composant, deux situations peuvent être rencontrées (table 4.5).

- Dans le cas où la physique de la défaillance n'est pas connue et afin de traiter plusieurs interactions, nous utiliserons la loi de Cox, basée sur des données statistiques.
- Lorsque le phénomène de dégradation menant à la défaillance est connu, la loi d'accélération appropriée sera utilisée. Par exemple, la loi d'Arrhenius sera utilisée dans le cas où l'interaction multi-domaine est représentée par un facteur de stress "température".

Données des interactions	Facteur d'influence	Loi de Stress
Données Physiques	Température	Loi d'Arrhenius
	Humidité	Loi de Peck
	Sur-pression, Vibration	Loi puissance inverse
Données Statistiques	Interactions	Loi de Cox

Table 4.5: Lois associées aux interactions multi-domaines

La loi de stress choisie en fonction du facteur d'influence de l'interaction multi-domaine (température, humidité, vibrations, etc.) sera intégrée au taux de défaillance inséré dans la transition de l'élément influencé.

4.7.3 Lois associées aux facteurs d'influence

Les facteurs d'influence (relatifs à la fiabilité) sont les éléments internes ou externes à une unité fonctionnelle, qui agissent sur la fiabilité de cette unité fonctionnelle, en suscitant, par exemple, des modifications de son taux de défaillance, comme illustré en Figure 4.11. Les influences peuvent être positives, en provoquant une réduction du nombre de défaillances par unité de temps, ou négatives, en provoquant des défaillances en plus grand nombre. Les facteurs d'influence sont présents dans toutes les phases de vie du système :

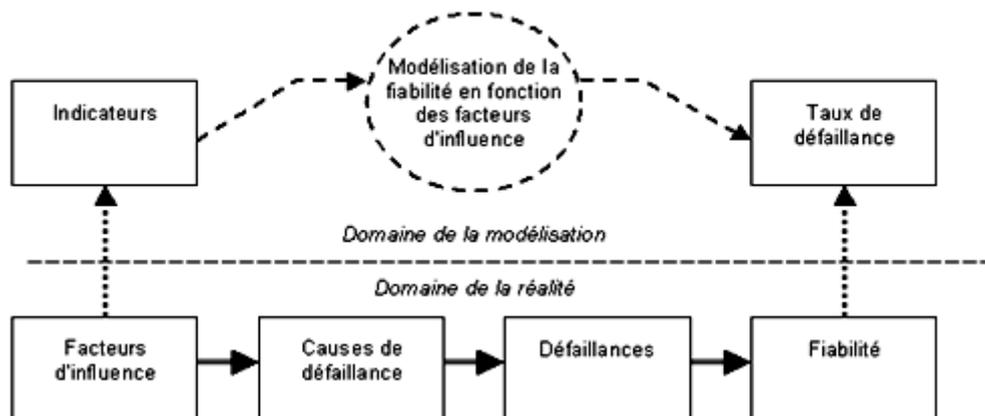


Figure 4.11: Les facteurs d'influence

- Conception : de nature intrinsèque au système (type, principe de fonctionnement, dimensions, matériaux, qualité, ...);

- Fabrication : le fabricant ou le procédé de fabrication;
- Installation (et mise en service) : techniques et procédures;
- Utilisation : fréquence et charge de sollicitation, exigences en matière de fiabilité, environnement (température, pression, humidité, poussières, impuretés, frictions, vibrations, chocs ...);
- Maintenance : quantité et qualité des actions préventives et correctives;
- Tout au long du cycle de vie : humains et organisationnels.

4.7.4 Loi d'Arrhenius

Le modèle d'Arrhenius [Carey and Koenig, 1991], proposé par [ARR-99], justifié par des considérations thermodynamiques, considère que le taux (vitesse) suit un processus physico-chimique en fonction exponentielle de la température, dans laquelle intervient la température absolue (T) et une température d'activation (T_a), spécifique du processus considéré. Cette température d'activation est une mesure indirecte de l'énergie d'activation thermique qui correspond à une barrière que doivent franchir les particules (atomes, ions, molécules) pour entraîner une dégradation thermique et avoir une influence sur le taux de défaillance (λ) du composant [Carey and Koenig, 1991]. Le mécanisme de franchissement de barrière correspond à une transition dont la durée (D) est définie par le passage de l'état initial à l'état dégradé. Le modèle relie la durée de vie d'un composant à sa température de fonctionnement :

$$D = \exp(-T_a/T) \quad (4.4)$$

$$V(t) = A_f \times \exp\left(\frac{-E_a}{KT}\right) \quad (4.5)$$

Où :

- $V(t)$: durée de vie du composant,
- $K = 8,6171 \times 10^{-5}$ eV/C : constante de Boltzmann,
- E_a : énergie d'activation, paramètre caractérisant la cinétique de dégradation en électron volt (eV). Cette information peut être trouvée dans des recueils de données comme FIDES.
- T_a : constante associée au composant
- A_f : facteur d'accélération entre deux températures différentes T et T'

$$A_f = (T'/T) \times \exp\left[\frac{-E_a}{K} \times (1/T - 1/T')\right] \quad (4.6)$$

4.7.5 Loi de Peck

Dans ce modèle, la vitesse de dégradation d'un système sensible à l'humidité [Peck, 1986], [Hallberg and Peck, 1991] est donnée par la relation :

$$V(H, t) = H^{-m} \times \exp\left(\frac{-E_a}{KT}\right) \quad (4.7)$$

Avec :

- m : constantes propre à l'essai, dépendante de la défaillance de la pièce à estimer à partir des résultats d'essais,
- T : température absolue,
- H : niveau d'humidité,
- E_a : énergie d'activation pour l'action de l'humidité (0,9 eV).

La pénétration de l'humidité jusqu'à la jonction :

$$H = H_a \times \exp\left(\frac{0,43}{K} * (1/T - 1/T_a)\right) \quad (4.8)$$

avec H l'humidité à la jonction (en %), H_a l'humidité ambiante (en %), T_j la température de jonction (K), et T_a la température ambiante (K).

Facteur d'accélération entre 2 environnements :

$$A_f = \left(\frac{H'}{H}\right)^n \times \exp\left(\frac{0,9}{K} * (1/T - 1/T_a)\right) \quad (4.9)$$

4.7.6 Loi puissance inverse

Le modèle de puissance inverse est utilisé lorsque le mécanisme d'endommagement est sensible à un stress particulier tel que la vibration pour les composants mécaniques [Allegri and Zhang, 2008]. Ce modèle décrit la cinétique d'une dégradation sous stress constant V ; la durée de vie τ est donnée par l'équation :

$$\tau = \frac{A}{V^\gamma} \quad (4.10)$$

Avec: V un stress quelconque, A et γ des constantes dépendant de la défaillance et de l'essai (elles sont estimées à partir des résultats d'essai). Le facteur d'accélération entre la durée de vie moyenne t_1 pour un stress V_1 et la durée de vie moyenne t_2 pour un stress V_2 est :

$$A_f = \frac{\tau_1}{\tau_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^\gamma \quad (4.11)$$

Afin de déterminer les valeurs et les paramètres de ces lois d'accélération, il existe dans la littérature plusieurs recueils de données nous citons par exemple le FIDES 2009 qui fournit des lois génériques pour différents facteur d'accélération.

4.7.7 Loi de Cox

Le modèle de Cox (1972) considère que le taux de défaillance λ ne dépend pas uniquement du temps, mais aussi des co-variables caractérisant les sollicitations :

$$\lambda_0 = \lambda(t, Z) \quad (4.12)$$

Le taux de défaillance est le produit entre le taux de défaillance de référence de base qui ne dépend pas des covariables [Mayo and Spanos, 2010] et la fonction de risque $\psi(Z)$, dépendant uniquement des covariables.

La taux de défaillance est calculé avec :

$$\lambda_t(Z) = \lambda_0(t) \times \exp^{(\beta \times Z)} \quad (4.13)$$

$$\lambda_t(Z) = \lambda_0(t) \times \exp^{(\beta_1 Z_1 + \dots + \beta_n Z_n)} \quad (4.14)$$

Avec :

- λ_0 : le taux de défaillances de base,
- $\beta^T = \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$: vecteur des coefficients du modèle de Cox, un vecteur de poids associés à chacune des covariables.
- Le vecteur $Z = (Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_i)$ correspond aux différentes caractéristiques de fonctionnement, de fabrication et de conception du composant, une caractéristique est associée à chaque valeur Z_i . Ces caractéristiques sont codées, permettant l'introduction des données qualitatives.

Les étapes pour l'estimation des facteurs d'influence du modèle de Cox sont [Brissaud et al., 2007] :

- Étape 1 :
 - le recueil des données d'entrées,
 - les temps de bon fonctionnement avant défaillance,
 - les états associés des facteurs d'influence,
- Étape 2 : établissement d'un codage pour les états des facteurs d'influence,
- Étape 3 : détermination des paramètres de la fonction d'influence,
- Étape 4 : détermination des paramètres du taux de défaillance de base.

Ce modèle est utilisé pour étudier l'influence de différentes variables intervenant dans le processus de dégradation d'un composant. Dans le cas d'évaluation de la fiabilité d'un système mécatronique, le modèle de Cox permet la prise en compte de plusieurs interactions multi-domaines influençant le même composant.

4.7.8 Réseau Bayésien dynamique de fiabilité

Pour prendre en compte le temps dans le modèle de la fiabilité, nous utilisons les réseaux Bayésiens dynamiques. Dans les travaux de [Weber and Jouffe, 2006], un composant est modélisé par deux nœuds (figure 4.12) et une variable aléatoire X_k avec des états (Up, Down) à l'état t et X_{k+1} en $t+1$. Dans ces modèles, le temps est représenté par des arcs de dépendance probabiliste temporelle et le pas de temps de « X_k » est affecté au nœud X_{k+1} .

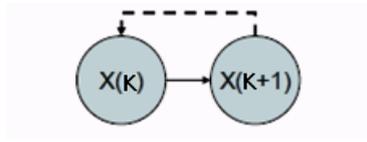


Figure 4.12: Modèle RBD de défaillance d'un composant

La matrice de passage des nœuds k aux nœuds $k+1$ est la matrice des probabilités conditionnelles df_X qui représente la probabilité que l'élément X soit défaillant durant une mission ; le taux de défaillance est considéré constant durant la durée d'une mission.

$$P(X_{k+1}/X_k) = \begin{bmatrix} P(Up^{k+1}/Up^k) & P(Down^{k+1}/Up^k) \\ P(Up^{k+1}/Down^k) & P(Down^{k+1}/Down^k) \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Et

$$P(X_{k+1}/X_k) = \begin{bmatrix} 1 - \lambda_x & \lambda_x \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Tel que:

$$P(Up^{k+1}/Up^k) = 1 - \lambda_x \quad (4.17)$$

correspond à la probabilité de non défaillance.

$$P(Down^{k+1}/Up^k) = \lambda_x \quad (4.18)$$

représente la probabilité de défaillance du composant, ce qui correspond au taux de défaillance si le pas entre deux transitions sans défaillance est 1.

$$P(Up^{k+1}/Down^k) = 0 \quad (4.19)$$

car il est impossible que l'élément fonctionne à nouveau en $(t+1)$ sachant qu'il a été en panne en t , sans réparation.

$$P(Down^{k+1}/Down^k) = 1 \quad (4.20)$$

Si l'intérêt de l'approche est évident, son application à des problèmes physiques réels reste difficile, car elle ne permet pas de décrire simplement les états de fonctionnement et de dysfonctionnement du système.

Modèle RBD de l'interaction multi-domaines

Afin de représenter une interaction multi-domaines lors de la modélisation dysfonctionnelle d'un système mécatronique par un réseau Bayésien dynamique, nous proposons deux modifications du modèle :

- Ajout d'un arc entre les nœuds "Y / X" dans le modèle RB ;
- Modification de la table de probabilités conditionnelle du nœud du composant influencé suivant la loi d'accélération associée (tableau).

$$P[X_{k+1} = Down / (X_{k+1} = Up \cap Y_{k+1} = Up)] = 1 - \lambda_{reference}; \quad (4.21)$$

Sans interaction, la probabilité conditionnelle est la même que celle de l'équation 4.21.

$$P[X_{k+1} = Down / (X_{k+1} = Up \cap Y_{k+1} = Down)] = 1 - \lambda_{Interaction}; \quad (4.22)$$

Représente la probabilité de défaillance de X, sachant que l'axe Y est en mode dégradé 4.13, ce qui correspond à un taux défaillance associé à l'interaction.

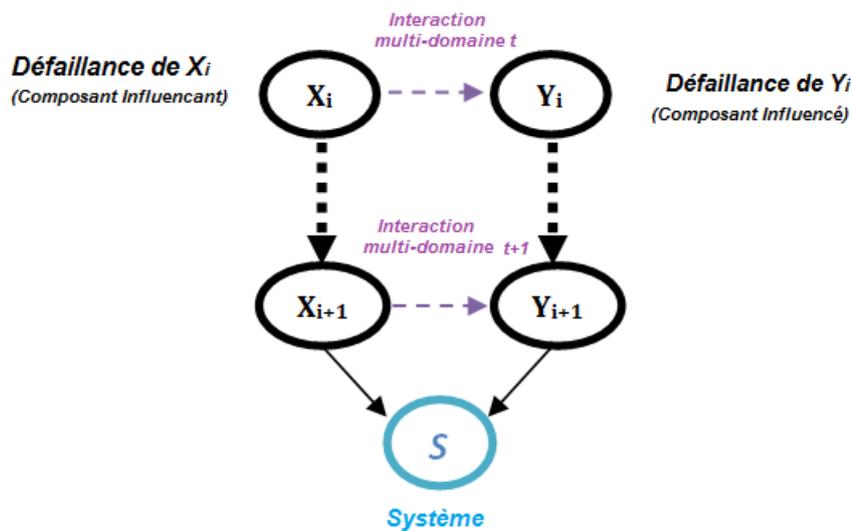


Figure 4.13: Modèle de réseau Bayésien de l'interaction multi domain

L'interaction « X/Y » est associée au nœud X_{t+1} et le TP proposé pour l'interaction est présentée dans la table 4.6.

Modèle RdP de l'interaction multi-domaines

Dans cette partie, l'interaction multi-domaines est ajoutée dans le modèle RdP. Le taux de défaillance $\lambda_{interaction}$ du composant j (élément influencé) de technologie différente est recalculé à partir de la dégradation d'un composant i (4.14) et de la loi de stress correspondante à l'interaction étudiée.

Y_t	X_t	Up	Down
Up	Up	$1-\lambda_{Yref}$	λ_{Yref}
	Down	0	1
Down	Up	$1-\lambda_{Interaction}$	$\lambda_{Interaction}$
	Down	0	1

Table 4.6: TCP de noeud X_{t+1} influencé par l'interaction

X_t	Up	Down
UP	$1-\lambda_{Xref}$	λ_{Xref}
Down	0	1

Table 4.7: TCP de noeud X_{t+1} non influencé par l'interaction

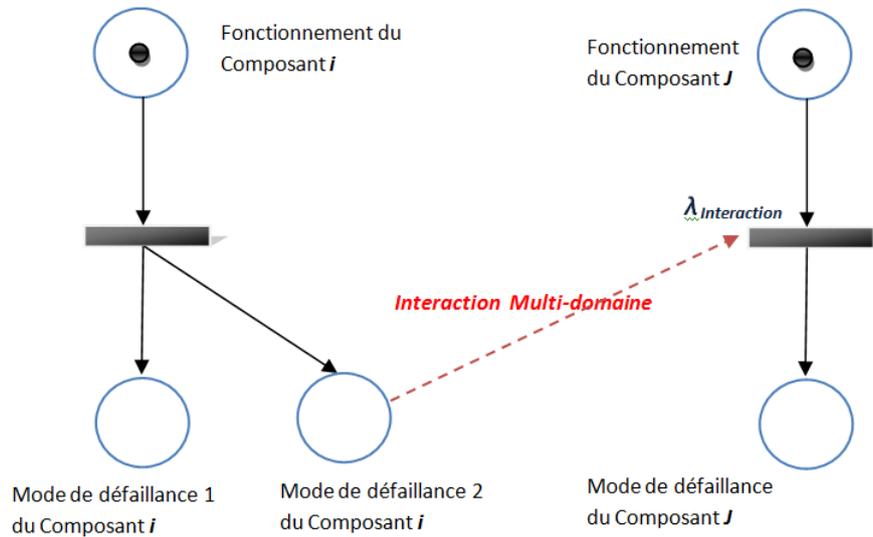


Figure 4.14: Modèle RdP de l'interaction multi-domaine

L'avantage des RdP par rapport aux RBD est la possibilité de représenter d'une manière dynamique l'équation de loi d'accélération du stress choisie (Arrhenius, Peck, Cox, etc.), exprimant ainsi l'influence temporelle de l'interaction multi-domaines.

4.8 Application à l'actionneur intelligent «Voice Coil»

4.8.1 Présentation du système

Afin d'illustrer la mise en œuvre de la méthodologie proposée, nous allons utiliser un exemple issu de la littérature [Habchi and Barthod, 2016] et nous appliquerons notre approche en phase de conception pour évaluer sa fiabilité prévisionnelle. Le système est l'actionneur intelligent «Voice Coil», un produit de la société Pack'Aero, utilisé par la fonction de déchargement de wagonnets. Le doigt de l'actionneur se met en obstacle pour ouvrir le volet et libérer le chargement du wagonnet sans arrêt. L'actionneur développe instantanément une force dans les deux sens en inversant la polarité d'excitation avec une d'hystérésis quasi nulle. Il est idéal pour les applications nécessitant un contrôle de mouvement bidirectionnel, précis et dynamique, telles que les vannes de commande, ou les systèmes de positionnement de miroir. Cet actionneur intelligent peut réaliser des fonctions supplémentaires telles que le contrôle, la surveillance, la communication, le traitement de l'information, etc. Les fonctions de l'actionneur «Voice Coil» sont :

- Passage du système passif au système actif (contrôle actif des vibrations, choc, etc.) ;
- Utilisation d'une action linéaire directe au lieu d'une action linéaire indirecte (actionneur linéaire) ;
- Intégration des fonctions de verrouillage électrique avec ou sans consommation électrique (aimant).

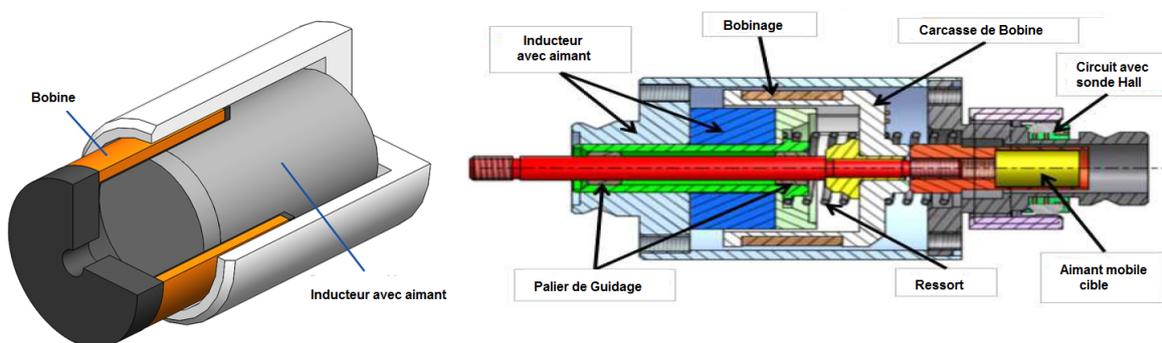


Figure 4.15: Présentation du système Actionneur Intelligent

L'actionneur "Voice Coil" est constitué d'une bobine mobile, dans laquelle un aimant permanent cylindrique fixe produit un champ magnétique radial. À l'intérieur du cylindre à aimant permanent, une bobine est enroulée autour d'une structure non conductrice ou d'un support. L'aimant permanent est logé dans un cylindre ferromagnétique ouvert à une extrémité et doté d'un «noyau» en son centre, indispensable pour compléter le circuit magnétique. L'ensemble bobine se trouve dans la lame d'air entre ce noyau et les surfaces intérieures de l'aimant permanent, dont le bobinage est traversé perpendiculairement par un flux magnétique fixe. Ce flux résulte une force mécanique proportionnelle au courant et réversible en fonction de la polarité du courant dans la direction de l'axe. Cette technologie d'actionneur électrodynamique est utilisée pour un système nécessitant un contrôle précis, une dynamique importante et un pilotage réversible. L'endurance mécanique est de plusieurs centaines de millions de cycles (Voir l'annexe 7.5).

4.8.2 Modélisation qualitative du l'actionneur intelligent

L'actionneur intelligent utilisé dans une chaîne de triage continu qui comprend un nombre de camions pouvant aller de 200 à 1000 selon l'application. Les camions transportent les pièces d'une station de la chaîne à l'autre en mouvement continu. L'actionneur intelligent contribue à la réalisation de la fonction de déchargement des wagons. Le doigt de l'actionneur intelligent sert d'arrêt pour ouvrir l'obturateur et relâcher la charge du wagon sans s'arrêter. L'analyse fonctionnelle complète du système «Actionneur Intelligent» peut être trouvée dans [Habchi and Barthod, 2016].

Diagramme pieuvre

Le diagramme pieuvre a été réalisé afin de connaître les interactions entre le système et les milieux extérieurs (fig 4.16). Il y a une seule fonction principale (FP), «l'ouverture du volet du wagonnet lorsqu'il arrive à la station de déchargement» et cinq fonctions contraintes .

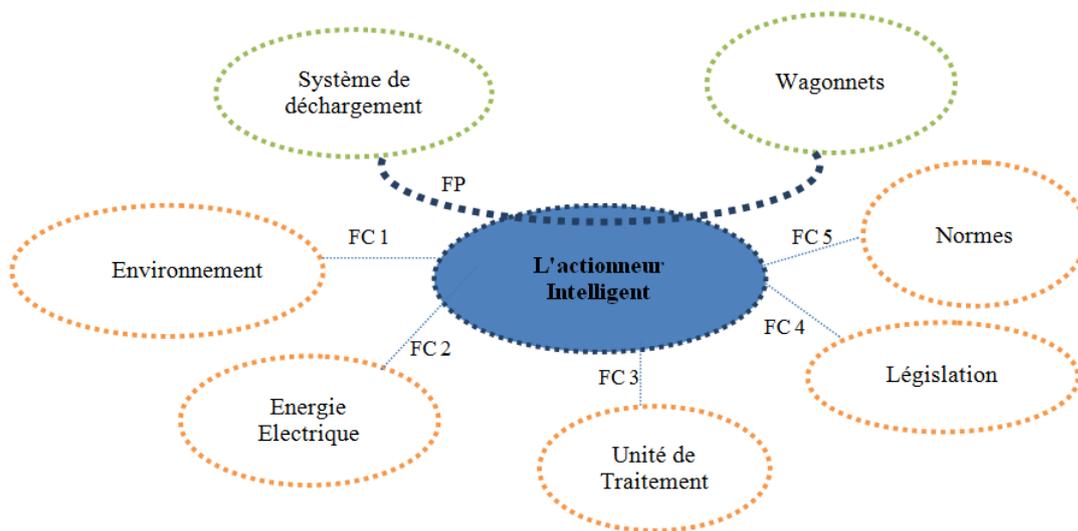


Figure 4.16: Diagramme pieuvre de l'actionneur intelligent

- FP : Permettre l'ouverture du volet du wagonnet lorsqu'il arrive à la station de déchargement.
- FC 1 : Résister à l'environnement thermique.
- FC 2 : Fonctionner avec la puissance électrique installée.
- FC 3 : Répondre aux exigences de la législation.
- FC 4 : Répondre aux exigences des normes.
- FC 5 : Permettre au système-maître de commander le fonctionnement (ON/OFF).

Cahier de Charge Fonctionnel (CDCF)

Le CdCF est présenté dans la table 4.8.

Fonction	Critère	Valeur
FP	Nombre moyen de cycles d'ouverture Fermeture avant la 1 ^{re} défaillance Durée de vie souhaitée Information de fonctionnement	Fonctionnement intermittent Puissance électrique: 1 Changement ON-OFF/60 ms Durée d'un cycle d'ouverture/fermeture: 40 ms Temps entre deux cycles: 1.67 s Temps de fonctionnement 20 h / 24, 6 jours / 7
FC1	Température et durée de la phase chaude Température et durée de la phase froide Température et durée de la phase tempérée	120°C pour 2/12 des cycles 5°C pour 4/12 des cycles 70°C pour 2 temps de 3/12 of cycles
FC2	Puissance électrique et Voltage	10 W et 24 V +/- 5
FC3	Les exigences de la législation	Directive de la Basse Tension: NSC 20-030 Directive de propreté de machine
FC4	Les normes	Degré de protection électrique: NFEN60529 Bruit émis par l'équipement: NFEN 11201
FC5	Ordre de fonctionnement Arrêter le fonctionnement	fonction TOR

Table 4.8: Cahier de charge fonctionnel de l'actionneur Intelligent

Analyse fonctionnelle interne : FAST

L’analyse fonctionnelle interne identifie les principales fonctions internes nécessaires pour réaliser la fonction principale (FP) de l’actionneur intelligent. Elle permet également de présenter les solutions techniques (voir le diagramme FAST de la figure 4.17)



Figure 4.17: Diagramme FAST de l’actionneur intelligent

L’AMDEC de l’actionneur intelligent a été réalisée par [Habchi and Barthod, 2016]. Dans la figure 4.18 est présentée l’AMDEC du composant "Bobine", composant que nous utiliserons pour l’estimation de la fiabilité prévisionnelle.

Sous système	composant	Fonction	Mode de défaillance	Cause	Effet	Origine du dommage	Classification : nature / rapidité de manifestation / amplitude
Bobine	Bobine + carcasse	F6	<ul style="list-style-type: none"> - Gonflement ou désémaillage thermo-chimique du fil de cuivre [8]. - Gonflement de la carcasse - Rupture de la matière - Rupture/casse fil [8] - Mauvais courant dans la bobine - Mauvaise position 	Echauffement thermique Vibration, chocs	Pas d'ouverture du volet	Collatéral	Seconde, progressive, partielle
				Pression ou vitesse de coulissement excessive	Pas d'ouverture du volet	Collatéral	Seconde, progressive, partielle
				Fatigue de la matière [8]	Pas d'ouverture du volet	Intrinsèque	Première, progressive, totale
				Défaillance inducteur avec aimant	Pas d'ouverture du volet	Fonctionnel (Inducteur → Bobine)	Première, soudaine, totale
				Défaillance Pont en H	Pas d'ouverture du volet	Fonctionnel (Pont en H → Bobine)	Première, soudaine, totale
				Décentrage tige	Pas d'ouverture du volet	Fonctionnel (Tige → Carcasse bobine)	Première, soudaine, totale

Figure 4.18: AMDEC de la bobine électrique de l'actionneur

4.8.3 Fiabilité de l'actionneur par BDF

L'analyse fonctionnelle et dysfonctionnelle a mis en évidence les éléments critiques du système : la carte de commande et de diagnostic de l'actionneur, la carte de conditionnement de la sonde à effet Hall, la sonde à effet Hall, la bobine, l'inducteur avec aimant et le palier de guidage. Ces éléments critiques ont un lien fonctionnel série. A partir du recueil de données cité dans [Habchi and Barthod, 2016], la Table 4.9 présente les taux de défaillance des éléments critiques, exprimés en heures⁻¹).

Composant	Taux de défaillance (1/h)
Carte de commande	1.16 E-06
Bobine électrique	5,10 E-05
Sonde à effet Hall	1.21 E-07
Carte de conditionnement	1.72 E-07
Inducteur	5.10 E-05
Palier de guidage	MTTF= 1,31 E+04 $\beta = 1.5$

Table 4.9: Taux de défaillance des composants de l'actionneur

Dans un premier lieu, nous faisons une simulation BDF de la fiabilité du système Actionneur Intelligent, c'est une représentation graphique du système et de la fiabilité, il s'agit d'un modèle Statique: pas de représentation du temps ni de l'ordre entre des événements successifs, et le comportement du système par rapport a la panne est modélisé par les connexions entre blocs, dont la fiabilité de système composé de n composants est calculée de la manière suivante:

$$R(\text{Système}_{\text{serie}}) = \prod_{i=1}^n R_{C_i} \tag{4.23}$$

$$R(\text{Système}_{\text{Parallele}}) = 1 - \left(\prod_{i=1}^n (1 - R_{C_i}) \right) \tag{4.24}$$

Le Bloc diagramme de fiabilité du système Actionneur Intelligent est présenté dans la figure 4.19 et a été traité avec le logiciel GRIF [CHABOT et al., 2001] :

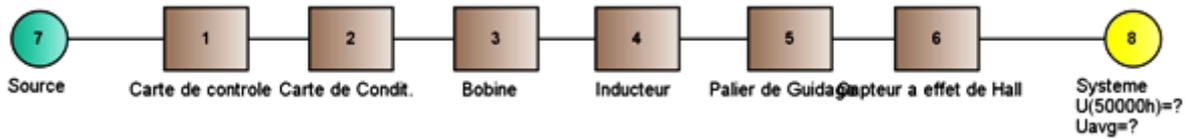


Figure 4.19: Diagramme de fiabilité de l'actionneur intelligent

La courbe de fiabilité prévisionnelle du l'actionneur intelligent est représentée dans la figure 4.20. La valeur de la fiabilité à 5000 heures est de 0,48.

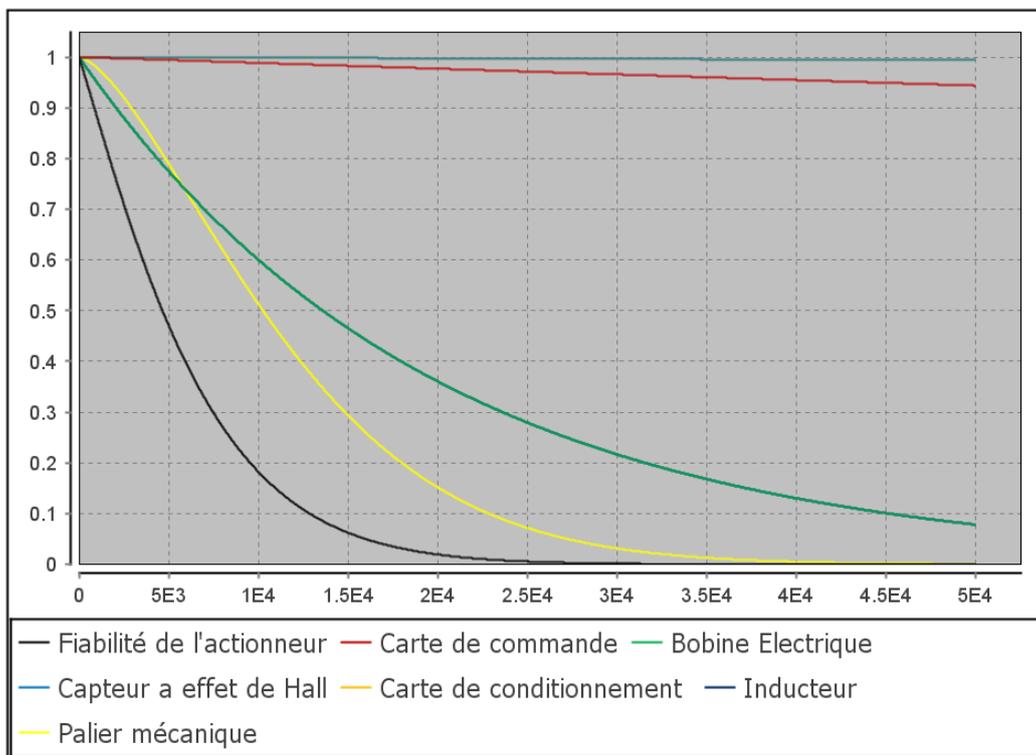


Figure 4.20: Courbe de fiabilité de l'actionneur intelligent par diagramme de fiabilité

4.8.4 Fiabilité de l'actionneur sans interaction domaine par réseaux Bayesiens

Le premier modèle réseau Bayésien dynamique de l'actionneur [Amrani et al., 2019a], considéré comme un système série, ne prend pas en compte les interactions. Nous avons limité le modèle à quatre composants (carte de commande, palier, bobine, sonde a effet Hall, avec leurs liens de causalité), en raison de leur importance dans la fiabilité du système. Le modèle RBD est présenté dans la figure 4.21.

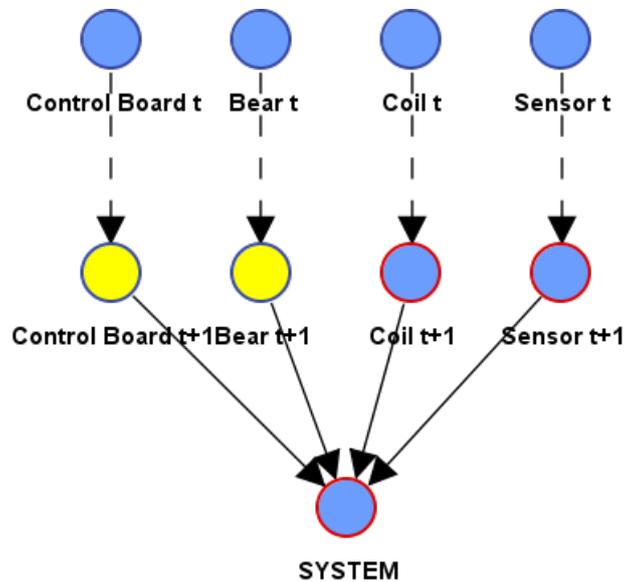


Figure 4.21: Réseau Bayésien dynamique du l'actionneur intelligent

La relation logique entre les composants est présentée par la table 4.22 de probabilités conditionnelles (TPC) associée au nœud système.

COTROL B...	COIL t+1	BEAR t+1	SENSOR t+1	UP	DOWN	
UP	UP	UP	UP	100,000	0,000	
		DOWN	DOWN	0,000	100,000	
	DOWN	UP	UP	0,000	100,000	
		DOWN	DOWN	0,000	100,000	
	DOWN	UP	UP	UP	0,000	100,000
			DOWN	DOWN	0,000	100,000
DOWN		UP	UP	0,000	100,000	
		DOWN	DOWN	0,000	100,000	

Figure 4.22: TPC du nœud système, en pourcentage

Dans la figure 4.22 sont présentés les nœuds de chaque composant et leurs modalités (valeurs discrètes) qui constituent le graphe causal. Pour chaque composant, des tables (TPC) 4.10 sont affectées à chaque nœud en se basant sur les équations écrites précédemment.

La simulation du système «actionneur intelligent» sans prise en compte d'interaction multi-domaines, en utilisant le logiciel BayesiaLab V.6. donne les résultats présentés dans la figure 4.23 :

Bobine	Up	Down
UP	$1-\lambda_{ref}$	λ_{ref}
Down	0	1

Table 4.10: TPC des éléments non influencés par l'interaction

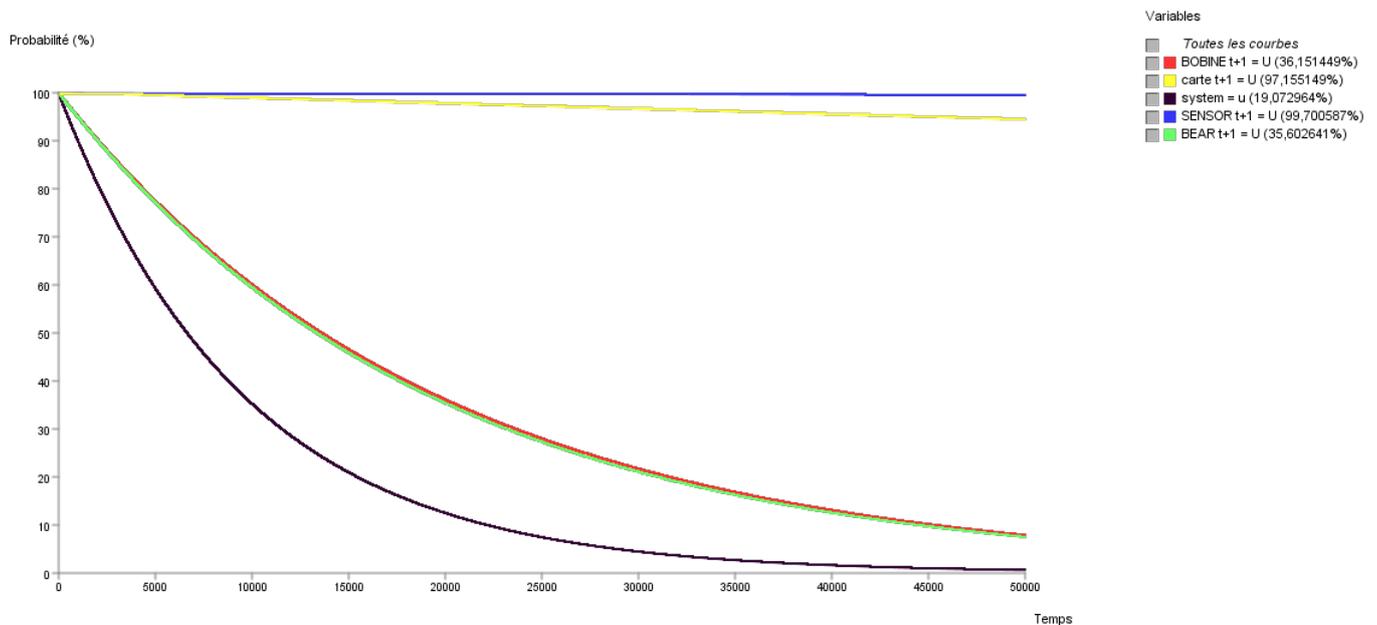


Figure 4.23: Courbe de fiabilité du système et de ses composants, sans prise en compte d'interaction multi-domaines

A partir de ces courbes de fiabilité, il est possible de conclure que la partie électronique du système (carte de conditionnement, carte de commande) est la partie la plus fiable et que la partie mécanique (palier de guidage) est la moins fiable, l'élément électrique (bobine) se situant entre les deux. Par exemple, pour 5000 heures de fonctionnement les valeurs obtenues pour les fiabilités sont :

- La fiabilité du système est $R_{systeme}(t = 5000h) = 0,593$.
- La fiabilité de la bobine est $R_{bobine}(t = 5000h) = 0,79$.
- La fiabilité du palier est $R_{palier}(t = 5000h) = 0,81$.
- La fiabilité de la carte de commande est $R_{carte}(t = 5000h) = 0,98$.

4.8.5 Fiabilité de l'actionneur par réseaux de Petri (RdP)

Nous avons évalué la fiabilité du même système à partir d'une modélisation par réseaux de Petri Stochastiques et Déterministes (RdPSD), à l'aide de l'outil Pétri Net V12 de la suite logicielle GRIF. La partie dysfonctionnelle du modèle RdP de l'actionneur intelligent est présentée dans la figure 4.24 [Amrani et al., 2016a].

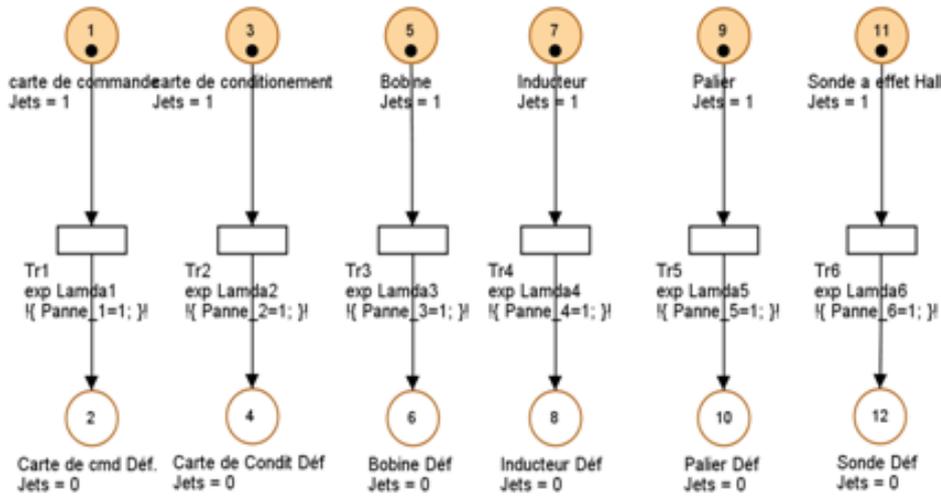


Figure 4.24: Modèle RdP de l'actionneur, sans prise en compte d'interactions

Nous avons utilisé la loi exponentielle pour la durée de vie des composants électroniques/électriques. Le taux de défaillance des équipements est considéré comme constant (défaillance aléatoire). Les conditions initiales du modèle RdP sont $(P1, P2, P3, P4, P5, P6) = (1, 1, 1, 1, 1, 1)$: le système est en état de bon fonctionnement à la mise en service (Figure 4.25).

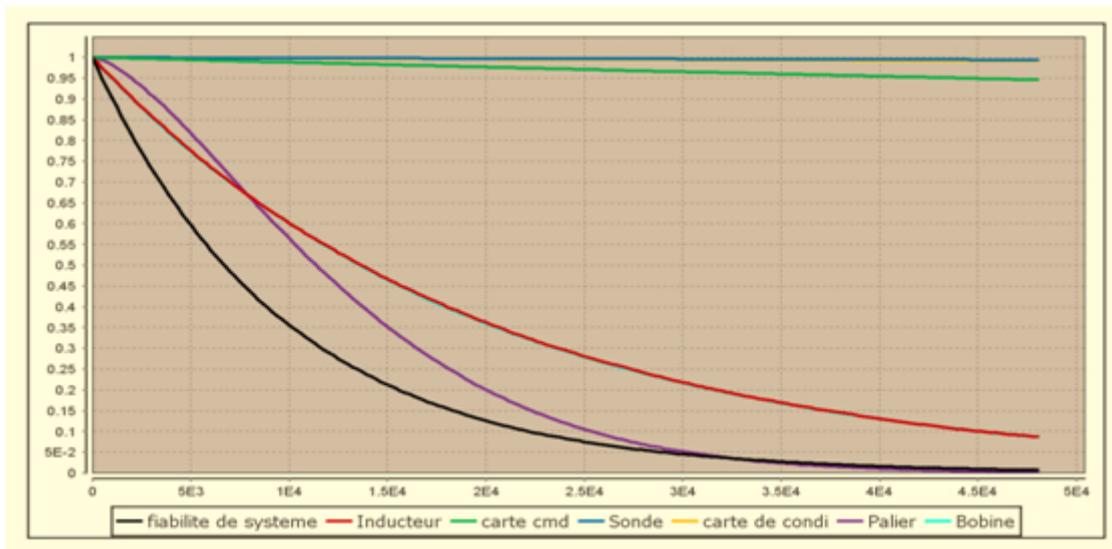


Figure 4.25: Fiabilité de l'actionneur intelligent sans prise en compte d'interaction

Les courbes de fiabilité (en phase de fonctionnement au profil "chaud") du système actionneur, ainsi que celle des composants modélisés (carte de commande et de diagnostic, carte de conditionnement de la sonde à effet Hall, sonde à effet Hall, bobine, inducteur avec aimant, et palier de guidage) sont représentées dans

la figure 4.25.. Les courbes de fiabilité, identiques au modèle de BDF, montrent que la bobine et les cartes électroniques sont les éléments les plus fiables et que la fiabilité du palier et celle de l'inducteur diminuent dès la première année. La simulation de Monte-Carlo effectuée avec l'outil GRIF PretriNets avec 1000000 histoires donne une fiabilité du système à 5000 heures de fonctionnement de $R(5000) = 0,4871$ et un intervalle de confiance à 90% de $[0,4862; 0,4879]$.

Pour 5000 heures de fonctionnement, les valeurs obtenues pour les fiabilités sont :

- La fiabilité du système est $R_{systeme}(t = 5000h) = 0,4871$.
- La fiabilité de la bobine est $R_{bobine}(t = 5000h) = 0,77$.
- La fiabilité du palier est $R_{Palier}(t = 5000h) = 0,81$.
- La fiabilité de la carte de commande est $R_{carte}(t = 5000h) = 0,994$.

4.8.6 Modélisation RBD de l'interaction multi-domaines palier/bobine

Nous avons pris comme exemple d'interaction multi-domaines l'interaction électrique/mécanique entre la bobine et le palier de guidage. Il s'agit d'une interaction exprimée par un seul facteur d'influence, la température. Dans le cas de la bobine, le phénomène de dégradation du palier mécanique 4.26 engendre un échauffement traduit par une loi d'accélération associée à la température, la loi d'Arrhenius. Afin de représenter le facteur d'influence «température», il faut caractériser et modéliser sa variation en fonction du temps au niveau de la bobine. Dans l'exemple considéré, la température varie de 20°C à 120°C en phase «chaud». L'augmentation de la température de la bobine va accélérer la défaillance, augmentant le taux de défaillance.

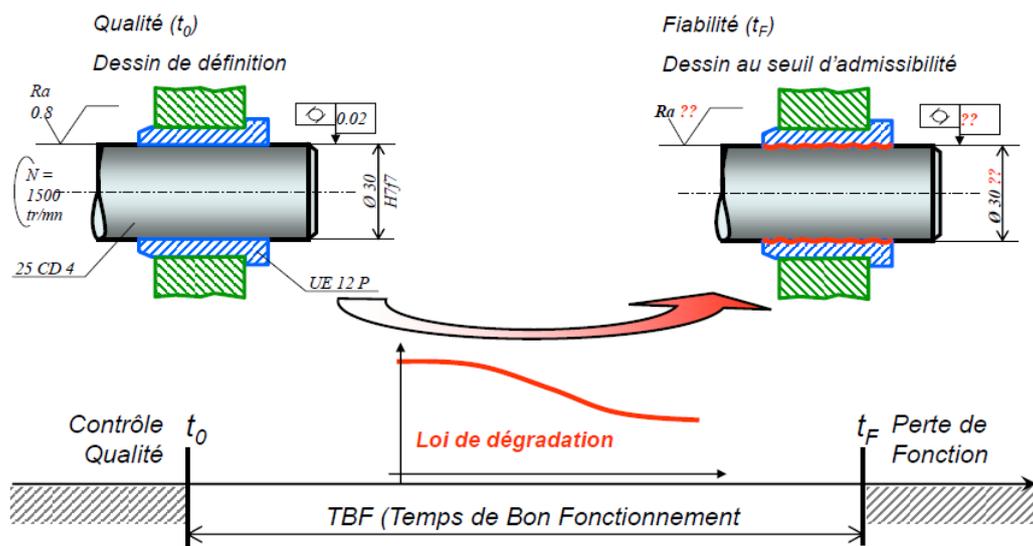


Figure 4.26: Modèle de dégradation du Palier

D'après [Tebbi, 2005], les modes de défaillance d'un palier mécanique sont :

Échauffement, Grippage, Rupture du palier, rupture bague, Usure, Matage, etc.

La loi d'Arrhenius, permettant de déterminer la fiabilité des composants électroniques en fonction de la température, est utilisée pour modéliser l'interaction étudiée. Les modes de défaillance de la bobine pris en considération sont :

- Gonflement ou démaillage thermo-chimique du fil du cuivre, causé par l'échauffement thermique ou vibration,
- Sur-intensité circulant dans la bobine.

Le facteur d'accélération est le rapport entre une température de fonctionnement prévisionnelle et une température générée par le palier de guidage fonctionnant en mode dégradé et défaillant. Dans le cas d'une loi de fiabilité exponentielle, les considérations thermodynamiques des travaux [Idee and Pierrat, 2010] permettent d'utiliser l'approximation suivante :

$$\lambda_{Arrhenius} = \lambda_{Reference} \times \exp[-T_a/T] \quad (4.25)$$

avec T_a : température d'activation dégradation de composant.

$Bobine_{t+1}$	$Palier_{t+1}$	Up	Down
Up	Up	$1-\lambda_{ref}$	λ_{ref}
	Down	0	1
Down	Up	$\lambda_{Arrhenius}$	$\lambda_{Arrhenius}$
	Down	0	1

Table 4.11: Table de probabilités conditionnelles de la bobine

Le nouveau modèle RBD de l'actionneur intelligent, tenant compte d'une interaction dysfonctionnelle palier/bobine, est présenté dans la figure 4.27. Les probabilités des différents noeuds estimées sont illustrées dans la figure 4.11.

Les probabilités des états du nœud «Bobine» du modèle RBD sont données par les valeurs approximatives obtenues à partir de la loi d'Arrhénius, $\lambda_{Bobine-Arrhenius} = 0.1710^{-3}h^{-1}$. La table 4.11 présente la table CPT pour l'interaction étudiée, associée au nœud (Bobine t+1). Les courbes de fiabilité pour le système et ses quatre composants, avec la prise en compte l'interaction multi-domaine palier/bobine, sont obtenues par simulation et sont présentées dans la figure 4.28.

Lorsque l'interaction multi-domaines palier/bobine est prise en compte dans l'estimation de la fiabilité, pour 5000 heures de fonctionnement, les valeurs obtenues pour les fiabilités sont :

- La fiabilité du système est $R_{système}(t = 5000h) = 0,31$.
- La fiabilité de la bobine est $R_{bobine}(t = 5000h) = 0,40$.
- La fiabilité du palier est $R_{palier}(t = 5000h) = 0,78$.
- La fiabilité de la carte de commande est $R_{carte}(t = 5000h) = 0,98$.

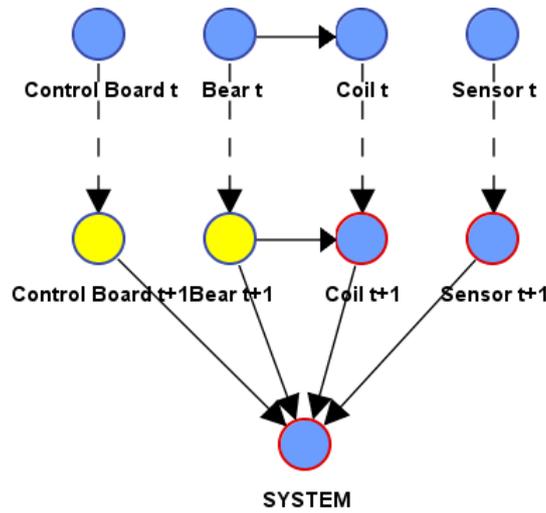


Figure 4.27: Modèle RBD de l'actionneur avec prise en compte de l'interaction palier/bobine

4.9 Comparaison des fiabilités obtenues avec et sans prise en compte de l'interaction palier/bobine

Pour la comparaison des résultats obtenus, nous avons utilisé l'outil Matlab BNT (code présenté dans les annexes 7.1 et 7.2). La Bayes Net Toolbox (BNT) est une librairie Matlab développée par Kevin Murphy [Murphy et al., 2001] sous licence publique générale GNU version 2 et permet de définir et d'exploiter différents types de modèles graphiques probabilistes.

Le modèle RBD de l'actionneur, construit à l'aide de BNT est présenté dans la figure 4.29.

Les courbes de fiabilité du système et de la bobine (élément influencé) sont présentées dans la figure 4.30.

La fiabilité du système et celle de la bobine (composant influencé), à 5000 h (7 mois) sont présentées dans la table 4.12:

	Sans Interaction Palier/Bobine	Avec Interaction Palier/Bobine
Fiabilité du système (t=5000 h)	0,593	0,324
Fiabilité de la bobine(t=5000 h)	0,774	0,423

Table 4.12: Comparaison des résultats obtenus pour la fiabilité dans les deux cas

Les valeurs des modalités du noeud «Bobine» calculées par la méthodologie classique diffèrent des valeurs calculées à l'aide du modèle proposé. L'écart important constaté montre l'influence des interactions multi-domaines sur la fiabilité des systèmes mécatroniques. Une évaluation de la fiabilité prévisionnelle sans la prise en compte de cette interaction conduit à des prévisions de dégradations ou défaillances avec une dérive de 35% à 5000h de fonctionnement.

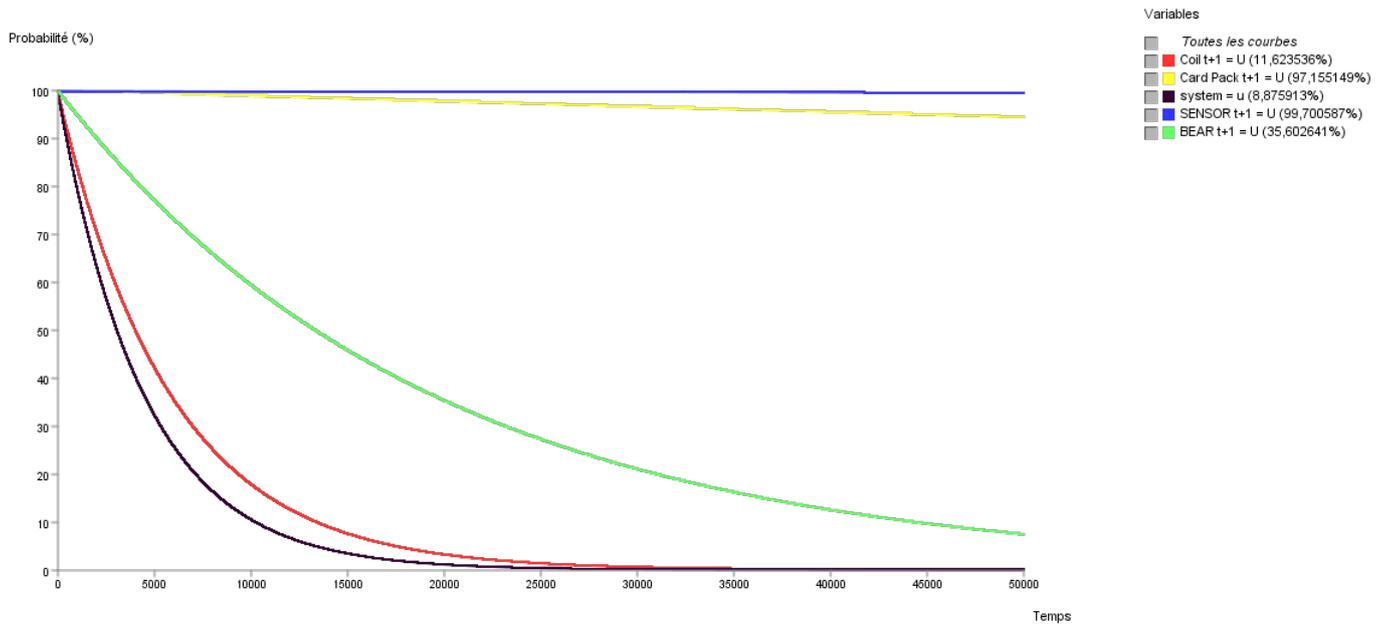


Figure 4.28: Courbes de fiabilité du système et de ses composants avec prise en compte de l’interaction Palier-Bobine

4.9.1 Modèle RdP de Fiabilité pour l’interaction palier/bobine

Afin de prendre en compte l’interaction multi-domaines entre le palier mécanique et la bobine électrique lors d’analyse de la fiabilité prévisionnelle de l’actionneur intelligent, le modèle RdP dysfonctionnel de la figure 4.24 est complété par l’intégration de la température comme facteur d’influence sur la bobine (figure 4.31).

La loi d’Arrhenius est intégrée dans la transition dysfonctionnelle de la bobine, qui suit la loi exponentielle.

4.9.2 Échauffement de la bobine

Le fonctionnement dégradé du palier engendre un transfert thermique vers la bobine (échauffement de la bobine), comme le montre la Figure 4.32.

En ajoutant à la température de fonctionnement normal du système, à 80 °C en phase "chaud", l’échauffement crée par la dégradation du palier, la température dépasse 110 °C. L’augmentation de la température de la bobine va accélérer sa défaillance et augmenter son taux de défaillance, donné par la loi d’Arrhenius :

$$\lambda_{Arrhenius} = \lambda_{Reference} \times \exp[-T_a/T] \tag{4.26}$$

En considérant une température d’activation $T_a = 80$ °C, et en intégrant la variable «température» dans la relation d’Arrhenius, la variation du taux de défaillance est représentée dans la figure 4.33:

Dans modèle RdP de la figure 4.24, la transition de dysfonctionnement de la bobine a été transformée en transition dynamique en intégrant l’évolution du taux de défaillance à partir de l’équation (4.24). Le graphe de la figure 4.33 représente la variation du taux de défaillance de la bobine avec l’évolution de la température. Cette variation commence de la valeur de référence ($5,1 \times 10^{-5}$ /h) et arrive à $4,3 \times 10^{-5}$ /h au

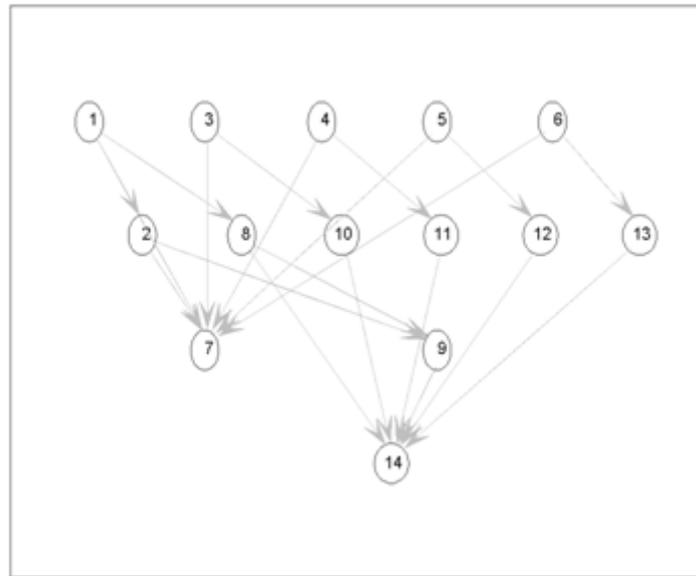


Figure 4.29: Modèle RBD de l'actionneur sous BNT

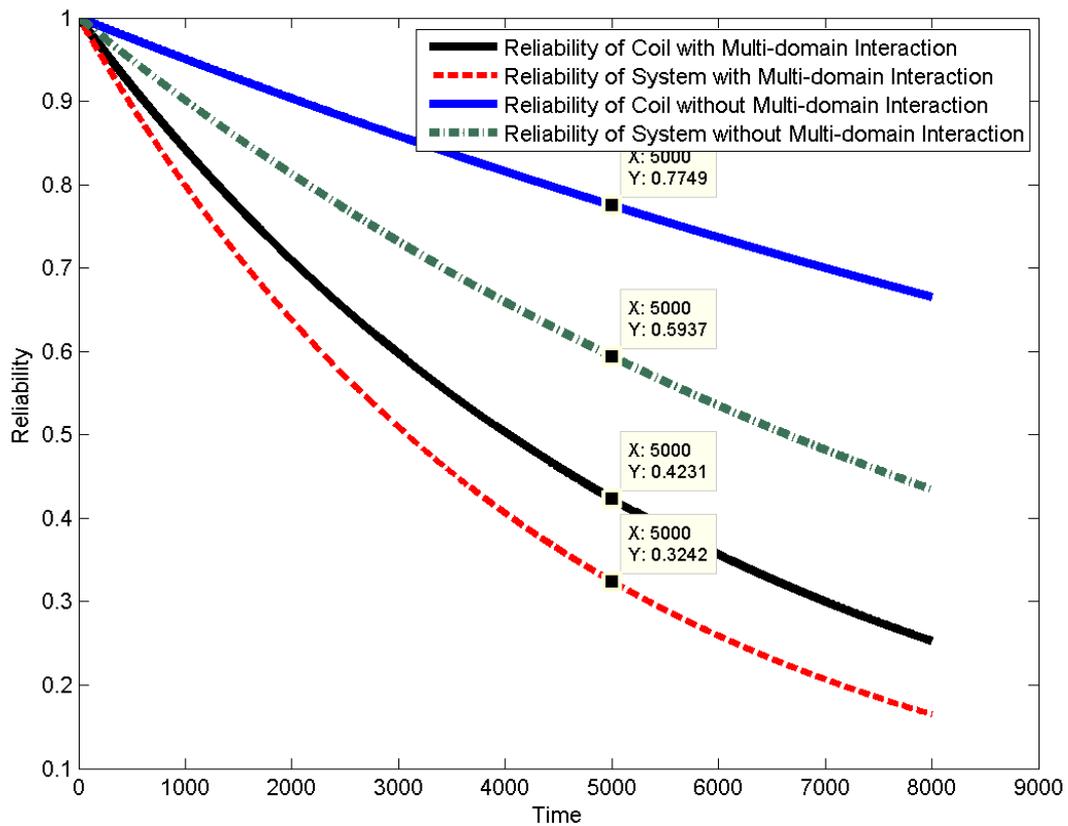


Figure 4.30: Fiabilité de l'Actionneur intelligent Sans/Avec prise en compte d'interaction

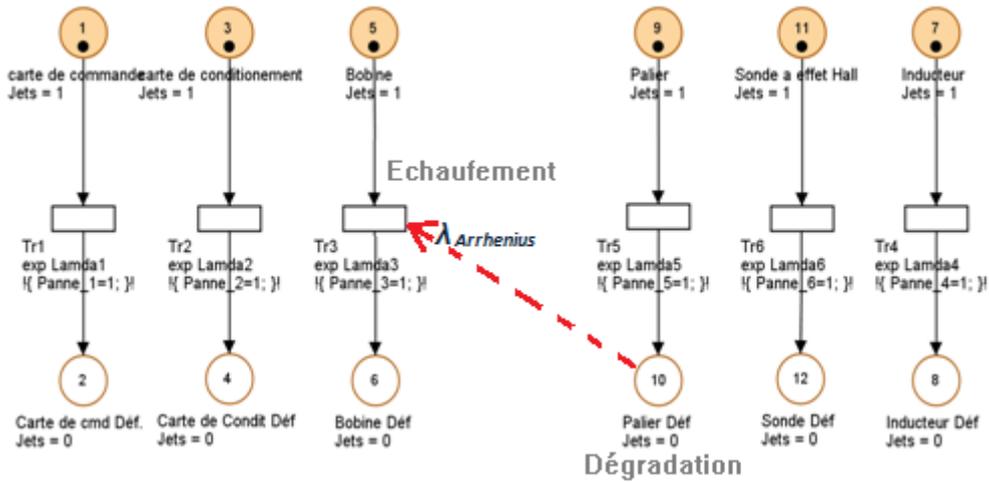


Figure 4.31: Modèle RdP de l'actionneur avec l'interaction multi-domaines

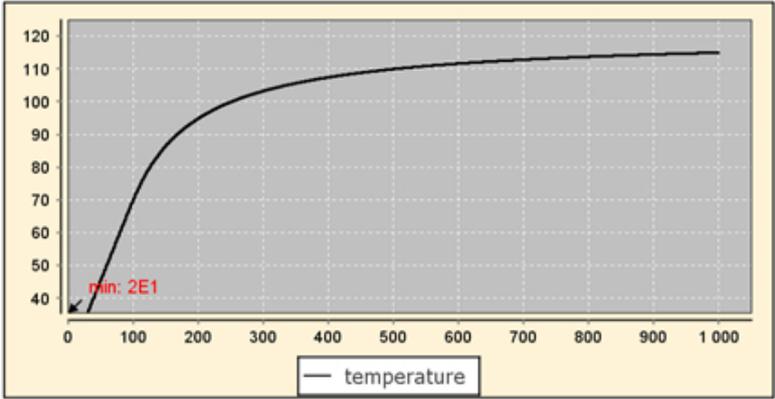


Figure 4.32: L'évolution de la température de la bobine

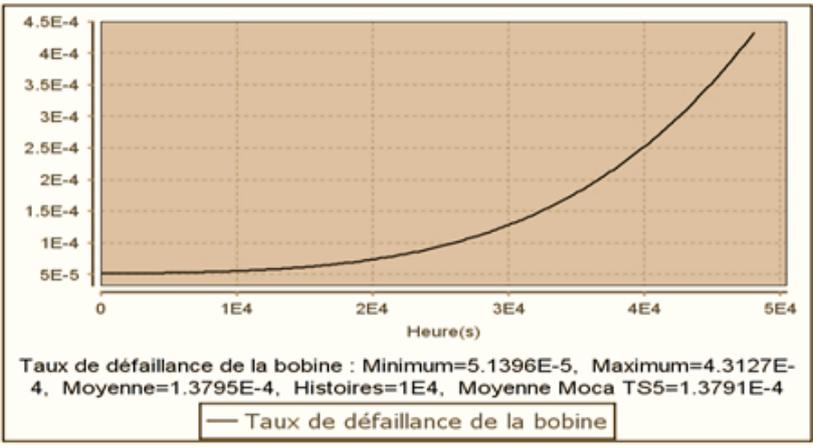


Figure 4.33: Graphe d'évolution de taux de défaillance de la bobine

4.9. COMPARAISON DES FIABILITÉS OBTENUES AVEC ET SANS PRISE EN COMPTE DE L'INTERACTIO

bout de $t = 5000h$, ce qui montre une augmentation d'un facteur 10 du taux de défaillance de la bobine au cours du temps de mission.

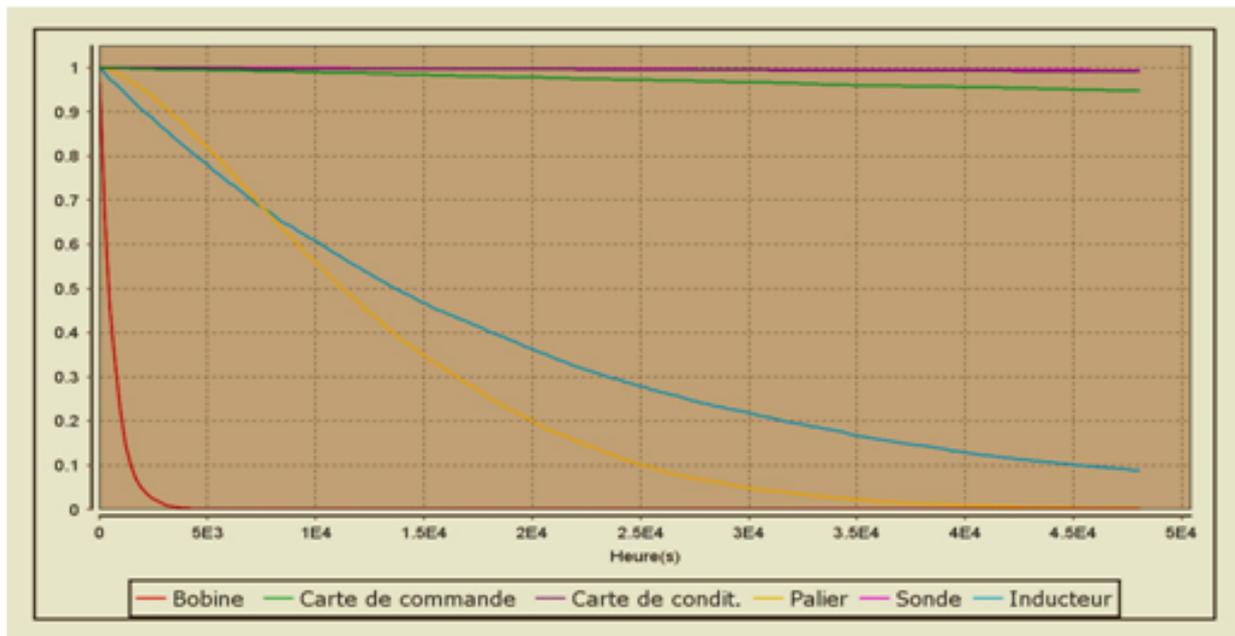


Figure 4.34: Courbes de fiabilité des composants du système avec la prise en compte des interactions

La fiabilité du système varie avec le taux de défaillance de la bobine (Figure 4.33), donc avec la température. La modélisation par RdP est différente de celle par RBD, dans laquelle le taux de défaillance de la bobine était considéré constant lors de la prise en compte des interactions. La contribution des facteurs d'influence apparaît dans la fiabilité de la bobine, élément concerné par l'interaction considérée. Les fiabilités des autres composants ne sont pas influencées par l'interaction. Les courbes de fiabilité des composants (la carte de commande et de diagnostic de l'actionneur, la carte de conditionnement de la sonde à effet Hall, la sonde à effet Hall, la bobine, l'inducteur avec aimant et le palier de guidage) sont présentées dans la figure 4.34.

La figure 4.34 montre que la diminution de la fiabilité du système est due à la diminution de la fiabilité de la bobine déterminée par l'interaction palier/bobine, qui représente l'élément Bobine est le plus critique sous réserve que cette interaction est la seule mentionnée par les experts de l'entreprise Pack'Aero. Cette différence représente l'influence de l'interaction palier/bobine.

Nous avons pris en compte l'interaction multi-domaine entre palier et bobine en la modélisant par la loi d'Arrhenius. Cette interaction a une influence importante sur la fiabilité du système, influence qui peut être observée dans les résultats obtenus pour la fiabilité système dans les deux cas : avec et sans prise en compte de l'interaction palier/bobine. Cette différence illustre l'impact de l'interaction sur le fonctionnement du système. Les résultats obtenus à l'aide des deux modèles (RdP et RBD) sont cohérents et montrent que la méthodologie proposée pour la prise en compte de l'interaction palier/bobine est efficace. La différence entre les résultats obtenus à l'aide des deux modèles peut être expliquée par le fait que le modèle RdP prend en compte la variation du stress généré, donc un taux de défaillance variable. L'impact de l'interaction

palier/bobine est pris en compte de manière dynamique, durant tout le cycle de vie de l'actionneur, alors qu'il est pris en compte de manière statique dans le modèle RBD.

4.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une démarche d'estimation de la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques, démarche qui permet de prendre en considération plusieurs aspects de ce type de système (dynamique, hybride). L'approche proposée permet d'évaluer l'impact des interactions multi-domaines sur la fiabilité du système étudié. Cette méthodologie est basée sur la représentation des interactions comme des facteurs d'influence, associés à des lois d'accélération.

Notre modèle d'évaluation de la fiabilité a pour objectif de proposer aux ingénieurs fiabilistes un outil efficace de prévision de la fiabilité d'un système mécatronique en phase de conception et de leur permettre de proposer les actions nécessaires pour l'amélioration de la fiabilité, afin de répondre aux objectifs fixés.

Notre démarche utilise deux outils de modélisation, les réseaux Bayésiens dynamiques et les réseaux de Petri stochastiques déterministes. L'avantage du modèle RBD est de diminuer l'explosion combinatoire du nombre d'états d'un système mécatronique complexe par une modélisation compacte, obtenue en regroupant des sous-système inter-connectés. L'avantage du modèle RdPSD est de pouvoir prendre en compte de manière dynamique l'influence des interactions multi-domaines tout au long du cycle de vie du système.

La prise en compte des interactions multi-domaines est importante dans l'estimation de la fiabilité prévisionnelle, afin de ne pas obtenir des estimations erronées (trop optimistes). Afin d'améliorer l'étude des interactions multi-domaines, le modèle de Cox pourra être utilisé, car il permet de traiter plusieurs interactions dans les deux sens.

La méthodologie proposée sera complétée par la prise en compte des incertitudes de modèle et de paramètres pour un système mécatronique. Cette problématique sera traitée dans le chapitre suivant.

Prise en compte des incertitudes épistémiques lors d'évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques

5.1 Introduction

Les approches conventionnelles d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle sont des approches probabilistes dans lesquelles les données de fiabilité relatives aux composants (taux de défaillance, taux de réparation, etc.) [Phillips et al., 2015], [Simon and Weber, 2009b], [Sallak et al., 2010], [Aguirre et al., 2011], sont issues des recueils de données et peuvent être validées par le retour d'expérience. La présence d'incertitude n'est généralement pas mentionnée dans ces approches. Dans le cas des systèmes très fiables, pour lesquels les défaillances sont très rares [Zhong et al., 2010], le retour d'expérience est insuffisant pour valider avec précision les taux de défaillance ou les lois de probabilités de défaillance [Abdelkhalak and Bouchaïb, 2013]. La situation idéale est de disposer d'une quantité d'information suffisante concernant les défaillances des composants pour pouvoir estimer avec précision leurs taux de défaillance et d'améliorer le degré de confiance en prenant en compte également les incertitudes épistémiques [Utkin and Coolen, 2007], [Simon and Weber, 2009a].

Dans ce chapitre, nous présentons les différents types d'incertitudes dans le domaine de la fiabilité et les éléments essentiels du formalisme des réseaux de croyance, afin d'introduire la notion de fiabilité imprécise. Il a été récemment montré qu'il existe des limitations à l'utilisation d'approches probabilistes pour représenter l'incertitude épistémique [Abdelkhalak and Bouchaïb, 2013]. L'approche non-probabiliste des fonctions de croyance proposée par Dempster-Shafer [Shafer, 1990] nous est apparue comme l'approche la plus pertinente à utiliser dans notre contexte d'évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques en phase de conception, car elle permet de caractériser les incertitudes épistémiques [Le Duy et al., 2010],

[Kochs et al., 2012].

Nous proposons dans ce chapitre de formaliser les Réseaux de Croyance (RC) sur la base des Réseaux Bayésiens Dynamiques (RBD) et des Fonctions de Croyance (FC) pour pouvoir prendre en compte simultanément l'imprécision et l'incertitude dans l'analyse de la fiabilité des systèmes mécatroniques, ainsi que les interactions multi-domaines. Ce réseau de croyance dynamique permet de représenter les dépendances conditionnelles dans un espace de description intégrant l'incertitude sous la forme de masses de croyance au sens de la théorie de Dempster-Shafer [Aguirre et al., 2013], [Duy and Duong, 2011]. Nous appliquerons cette approche au traitement des incertitudes dans l'estimations de la fiabilité de l'actionneur intelligent.

5.2 Contexte et Problématique

En général, nous considérons l'incertitude parce que nous cherchons à répondre à une question au sujet d'un événement au futur, une mesure physique, etc., qui ne nous permet pas de donner une réponse unique ou précise. Néanmoins, nous sommes prêts et capables d'affirmer dans une certaine mesure comment affirmer notre croyance. Cette question peut se référer, par exemple, les prévisions météo pour un jour donné, désignant des objets, et la reconnaissance d'objets dans les véhicules intelligents, la perception de l'environnement dans les maisons intelligentes, etc. Dans notre cas, nous nous concentrons sur des questions relatives à la fiabilité des systèmes mécatroniques, plus précisément: " Dans quelle mesure nous pensons qu'un système ou ses composants sont fiables ? " Telle est la perspective d'un décideur. Du point de vue de l'expert en incertitude, la question serait: « Comment peut-on prédire le comportement d'un composant/système à travers le temps ? » En règle générale, la date de défaillance ne peut pas être prédit avec précision.

L'évaluation de la fiabilité repose sur la modélisation par des modèles mathématiques de probabilité et de vieillissement physique du comportement de chaque composant. Lors d'études d'évaluation de la fiabilité des systèmes complexes en général, et particulièrement pour un système mécatronique, la prise en considération des incertitudes est importante afin de prédire la fiabilité avec un certain degré de confiance.

L'incertitude de modélisation provient du caractère imparfait des modèles théoriques utilisés pour représenter les phénomènes (idéalisations, imperfections, mauvaise compréhension des problèmes, etc.). En statistiques, deux types d'incertitude sont définies : l'incomplétude et l'indétermination, en fonction des sources d'incertitudes.

- L'incomplétude de l'information vient de la représentation simplifiée utilise seulement une partie de l'information disponible [Walley, 1991];
- L'indétermination reflète les limites de l'information disponible [Walley, 1991]. Dans la pratique, il est difficile de trouver la frontière entre l'incomplétude et l'indétermination ; cependant, une tendance vers l'une ou l'autre peut être remarquée [LARSSON, 2015].

La quantification des incertitudes dans la modélisation de la fiabilité est traitée dans de nombreux travaux [Phillips et al., 2015];[Aguirre et al.,],[Felipe AGUIRRE MARTINEZ, 2012], [Utkin and Coolen, 2007], [Simon and Weber, 2008], [Simon and Weber, 2009b], [Simon and Weber, 2009a], montrant la diversité des

questions pouvant être associées à cette thématique. S'intéresser aux incertitudes, c'est s'intéresser aux problèmes liés à la qualité des données utilisées, à la question de l'estimation des paramètres, ou encore aux problématiques liées à l'évaluation des modèles de fiabilité avec la prise en compte des interactions multi-domaines.

Les différentes méthodes proposées ces dernières années peuvent être caractérisées selon :

- Le contexte de modélisation : simulation ou prévision,
- Le formalisme mathématique : approches probabilistes ou non probabilistes,
- Les différentes sources d'incertitude quantifiées : données, paramètres, modèle,
- L'objectif poursuivi : meilleure connaissance du modèle, du système modélisé, quantification des marges d'erreur sur les sorties du modèle.

L'incertitude n'est pas dans les choses, mais dans notre tête : l'incertitude est le manque de connaissance(Jacques Bernoulli).

5.3 Les types d'incertitudes

Les incertitudes peuvent être classées en deux grandes catégories (figure 5.1) : l'incertitude épistémique et l'incertitude aléatoire [Coit et al., 2004].

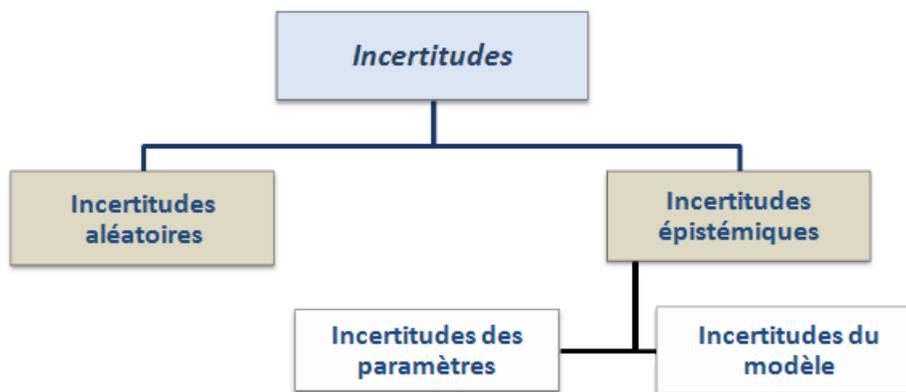


Figure 5.1: Types d'incertitudes[Duy and Duong, 2011]

5.3.1 Incertainces aléatoires

L'incertitude aléatoire est également appelée variabilité, incertitude irréductible, incertitude inhérente et incertitude stochastique [Kochs et al., 2012]. Nous utiliserons le terme incertitude aléatoire pour décrire la

variation inhérente associée au système physique ou à l'environnement considéré. Les incertitudes aléatoires sont caractérisées par des événements aléatoires [Duy and Duong, 2011] tels que : l'événement initiateur, la défaillance à la sollicitation, la défaillance en fonctionnement, auxquels différents modèles peuvent être associés (Poisson, binomial, etc.).

5.3.2 Incertitudes épistémiques

L'incertitude épistémique est également appelée incertitude réductible, incertitude subjective et incertitude sur la forme du modèle. L'incertitude épistémique provient d'une information incomplète sur le système ou sur l'environnement environnant [Oberkampf et al., 2004]. La connaissance insuffisante est une caractéristique de l'incertitude épistémique ; les connaissances insuffisantes limitent l'utilisation de la probabilité empirique et l'utilisation de la probabilité subjective peut conduire à des résultats controversés. Les incertitudes épistémiques résultent des connaissances imprécises, non observables, cognitives et réductibles et sont divisées en deux catégories :

Incertitudes de modèle

Ce sont des incertitudes résultant de simplifications, d'hypothèses liées à un manque de connaissance sur un système. Les incertitudes de modèle peuvent être très nombreuses et porter sur différentes parties du modèle. Le développement d'un modèle est en général basé sur un certain nombre d'hypothèses qui sont des décisions ou des jugements pris en compte par les analystes. On distingue les hypothèses admises et justifiées, les hypothèses alternatives du modèle, les hypothèses liées aux simplifications [Melchers and Beck, 2018].

Un modèle est considéré comme un outil : c'est donc une formule mathématique (expression explicite, formulation implicite ou approximation numérique) permettant une modélisation physique, mécanique ou statistique d'un phénomène, une règle de calcul ou de classement (croisement de paramètres, échelle empirique basée sur l'expertise brute ou le retour d'expérience, etc.). La modélisation d'un système, d'un comportement ne vient au départ que de l'esprit de la personne qui a su imaginer une représentation, mettre en place des concepts, expérimenter sur des systèmes réels afin de valider son modèle par rapport à une réalité. La plupart des modèles utilisés sont des simplifications d'une physique complexe. Dans un domaine limité d'utilisation ou d'expérimentation, les incertitudes considérées [You and Tonon, 2012] sont liées aux:

- Simplifications de la structure d'un système,
- Dépendances et relations logiques (OU, ET, ...) entre les composants,
- Modes de défaillance communs.

Incertitudes de paramètres

Ce type d'incertitude concerne les données et la notion de valeur (numérique, discrète, qualitative, quantitative, etc.). Il faut distinguer entre une donnée et un paramètre de modèle. La donnée concerne la valeur

d'une dimension de l'objet analysé, d'une caractéristique électrique, mécanique, etc. Le paramètre de modèle peut être déterminée par un retour d'expérience sur des événements du passé et sa valeur est la même quel que soit le site d'étude. C'est une incertitude due au caractère imparfait de l'instrument utilisé, incertitude statistique due à un manque d'information, comme :

- Manque d'information pour les données de fiabilité des composants du système (λ, μ, \dots),
- Imprécision des données relatives au profil de fonctionnement,
- Imprécision dans la détermination des coefficients d'état.

Il n'existe pas de consensus sur les méthodes les plus appropriées pour aborder les incertitudes dans la modélisation de la fiabilité des systèmes mécatroniques. Nous proposons d'utiliser les fonctions de croyance pour le traitement des incertitudes dans l'analyse de la fiabilité.

5.4 Réseaux de croyance

5.4.1 Introduction aux fonctions de croyance

Les travaux d'Arthur Pentland Dempster sur les bornes inférieures et supérieures des probabilités à la fin des années 60 ont permis à Glenn Shafer [Shafer, 1976] d'établir les bases des fonctions de croyance et de montrer leur intérêt dans son livre de 1976, "A Mathematical Theory of Evidence". La théorie des fonctions de croyance est souvent appelée la théorie de Dempster-Shafer, la théorie des croyances ou la théorie de l'évidence. La théorie des fonctions de croyance est un cadre riche et flexible généralisant l'inférence Bayésienne au traitement de l'incertain ; elle est basée sur un fondement mathématique robuste qui permet de représenter l'incertitude que l'on peut avoir sur une information ou un phénomène à traiter, et de représenter les informations imparfaites. De nombreux travaux ont mis en évidence l'intérêt de cette théorie, utilisée dans différents types d'applications : fusion d'informations, résolution de problèmes de diagnostic, reconnaissance de formes.

Dans cette partie, nous présentons d'abord les notions fondamentales de la théorie des fonctions de croyance à travers les différentes fonctions développées. Ensuite, nous les utiliserons pour la prise en compte des incertitudes épistémiques dans l'étude de la fiabilité des systèmes.

Fonction de masse de croyance

Soit $\omega = [\omega_1, \dots, \omega_K]$; ω_k un ensemble fini, appelé «cadre de discernement» ; la connaissance détenue par un agent Ag est représentée par une fonction de masse de croyance définie pour 2^ω , à valeurs dans $[0, 1]$, où 2^ω est l'ensemble de tous les sous-ensembles possibles de ω , vérifiant la condition suivante :

$$\sum_{A \subseteq \Omega} m(A) = 1 \quad \forall A \subseteq \Omega; \quad (5.1)$$

Cette définition traduit un état de connaissance partielle sur la valeur d'une variable ω à valeurs dans Ω . La quantité $m(A)$ représente la croyance accordée au fait que A contienne la réponse à la question Q.

Dans l'état actuel des connaissances, la part de croyance ne peut pas être allouée à un sous-ensemble de A . On affecte ainsi à l'ensemble des éléments de A une croyance en chacun d'entre eux sans prendre partie pour l'un de ces éléments. Ainsi, à la différence des probabilités, il est possible d'allouer de la croyance non seulement à des singletons (éléments seuls), mais aussi à des sous-ensembles. Un ensemble A tel que $m(A) > 0$ est appelé élément focal. La réunion des éléments focaux constitue le noyau. Il est à noter que Shafer a imposé une contrainte supplémentaire $m(\phi) = 0$. Cette contrainte fait référence au monde fermé qui impose l'exhaustivité de l'ensemble.

5.4.2 Définitions : Fonctions de croyance

Plusieurs fonctions de masse de croyance particulières ont été définies [Shafer, 1990] [Smets, 2008]:

Fonction de masse normale

Une fonction de masse m est dite normale lorsque $m(\phi) = 0$.

Fonction de masse catégorique

Une fonction de masse m catégorique a un seul élément focal A tel que $m(A) = 1$. Dans le cas où A est un ensemble, la connaissance est certaine, mais imprécise. Pour $A = \omega_k$, la connaissance est certaine et précise.

Fonction de masse vide

Une fonction m est une fonction de masse vide, lorsque la fonction m est catégorique en Ω : $m(\Omega) = 1$. Cela représente l'ignorance totale.

Fonction de masse bayésienne

Une fonction de masse m est dite bayésienne si tous les éléments focaux sont des singletons de Ω :

$$\sum_{\omega \subseteq \Omega} m(\omega) = 1 \quad (5.2)$$

Fonction de masse dogmatique

Une fonction de masse m est dite dogmatique si: $m(\Omega) = 0$.

Fonction de masse consonante

Une fonction de masse m est dite consonante si tous les éléments focaux sont emboîtés.

Fonction de masse à support simple

Une fonction de masse m est dite à support simple lorsqu'elle a deux éléments focaux dont l'un est :

$$m(A) = 1 - \omega \quad A \subset \Omega \quad (5.3)$$

$$m(\Omega) = 1 - \omega \quad (5.4)$$

$$m(B) = 0 \quad B \neq A \subset \Omega \quad (5.5)$$

Dans ce cas, la fonction m peut également être notée A^ω où ω représente le poids de l'ignorance de la fonction m .

Fonction de crédibilité (Belief, Bel)

La fonction de croyance ou de crédibilité est la part de croyance spécifiquement allouée à A. La crédibilité de A (notée $Bel(A)$) représente la croyance minimale soutenant une proposition A. C'est une interprétation pessimiste de la fonction de masse et elle est définie de la manière suivante :

$$Bel(A) = \sum_{\substack{B \\ \neq A \subseteq \Omega}} m(B) \quad \forall A \subseteq \Omega \quad (5.6)$$

La fonction $Bel(B)$ représente le degré de croyance en B, compte tenu de tous les éléments qui accrédi- tent, directement ou non, ce sous-ensemble.

Fonction de plausibilité (Plausibility, Pl)

La fonction de plausibilité de A est le degré maximal de croyance qui pourrait être attribué à A. C'est une interprétation optimiste de la fonction de masse introduite par Shafer [Shafer, 1990]. Elle est définie par :

$$Pl(A) = \sum_{A \cap B} m(B) \quad \forall A \subseteq \Omega \quad (5.7)$$

La fonction $Pl(B)$ représente la part de croyance qui pourrait potentiellement être allouée à B, compte tenu des éléments qui ne discréditent pas ce sous-ensemble. L'équation signifie que plus on augmente la croyance dans une hypothèse, moins l'hypothèse contraire devient plausible ; nous avons ainsi :

$$Pl(A) = \sum_{A \cap B} m(B) \quad \forall A \subseteq \Omega \quad (5.8)$$

$$Pl(A) = bel(\Omega) - bel(A) \quad (5.9)$$

$$Pl(A) = 1 - m(\phi) - bel(A) \quad (5.10)$$

Donc :

$$Bel(A) = 1 - Bel(\bar{A}) \quad (5.11)$$

$$Pl(A) = 1 - Pl(\bar{A}) \quad (5.12)$$

La plausibilité (respectivement la croyance) peut être interprétée comme la borne supérieure (respectivement la borne inférieure) de la probabilité induite par une famille de distributions probabilistes. Ainsi, l'intervalle $[Bel(B), Pl(B)]$ peut être vu comme un intervalle encadrant une probabilité $P(B)$ mal connue. La crédibilité peut être vue comme la croyance totale allouée à A, compte tenu des informations disponibles, alors que la plausibilité (toujours plus grande que la crédibilité) représente une borne supérieure de la croyance qui pourrait être allouée à A après intégration de nouvelles informations.

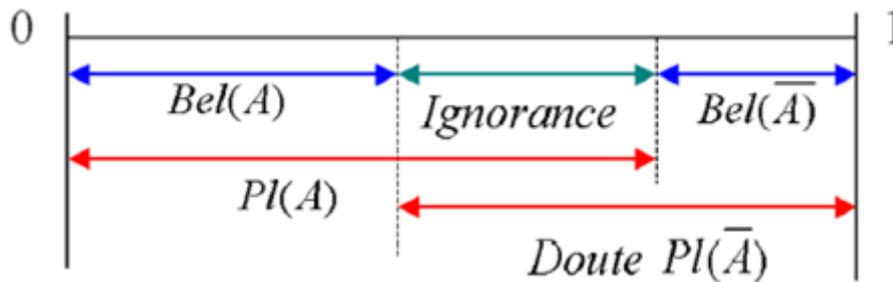


Figure 5.2: Limites entre les fonctions de croyances

La différence $1 - (Bel(A) + Pl(A))$ est appelée « l'ignorance ». Cet écart entre $Pl(A)$ et $Bel(A)$ mesure l'ignorance relative à B. Lorsque tous les éléments focaux sont réduits à des singletons, les fonctions de croyance et de plausibilité se confondent avec la fonction de probabilité classique.

5.4.3 Obtention d'une fonction de croyance

Lorsqu'un expert exprime son opinion sous la forme d'une fonction de croyance de manière directe, la représentation des croyances est fortement dépendante de l'application. Deux familles de masses de croyance peuvent être distinguées :

- Les masses de croyances estimées à partir de distances, démarche proposée par [Zouhal and Denoeux, 1998], [Denoeux, 2004] ;
- Les masses de croyances estimées à partir de vraisemblances. Pour ce modèle, on distingue deux approches, l'approche globale et l'approche séparable. L'approche globale, développée par Shafer [Shafer, 1990], conduit à une fonction de croyance consonante. L'obtention d'une fonction de masse consonante interprète toujours les connaissances vers l'hypothèse ayant la probabilité la plus importante. L'approche séparable, proposée par [Smets, 2008], construit des fonctions de masse pour chaque élément du cadre de discernement.

Nous avons utilisé une méthode permettant d'intégrer le modèle de vraisemblance, même lorsque le cadre de discernement est de grande taille.

La figure 5.3 présente une explication graphique des fonctions de croyance (crédibilité et plausibilité) et leurs relation avec les masses de croyance existantes.

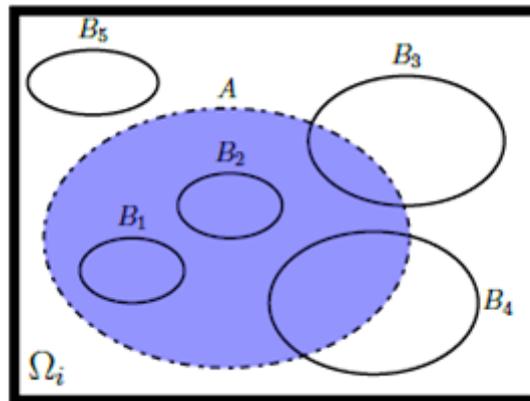


Figure 5.3: Exemples des fonctions de croyances

$$Bel(A) = m(B_1) + m(B_2) \quad (5.13)$$

$$Pl(A) = m(B_1) + m(B_2) + m(B_3) + m(B_4) \quad (5.14)$$

5.4.4 État de l'art : Fonctions de croyance en fiabilité

Partant du constat que la théorie des probabilités classique modélise les incertitudes aléatoires et épistémiques par une seule distribution de probabilités, un autre constat proposé dans la théorie de Dempster-Shafer pour évaluer l'incertitude épistémique dans [Limbourg, 2008], [Limbourg et al., 2008], [de Rocquigny et al., 2008] [Sallak et al., 2010].

L'utilisation des fonctions de croyance dans les études de sûreté de fonctionnement, et notamment de fiabilité a été proposée par [Guth, 1991], en passant du cadre de discernement probabiliste à un cadre adéquat aux fonctions de croyance. [Almond, 1995] a développé des modèles graphiques en utilisant des fonctions de croyance, appliqués aux arbres de défaillances. Dans [Bobbio et al., 2001], les portes logiques ont été converties en réseaux Bayésiens dans un cadre probabiliste et des fonctions de croyance ont été associées au RB afin de prédire la fiabilité des systèmes.

[Simon and Weber, 2009a] ont proposé d'utiliser conjointement les réseaux Bayésiens et la théorie D-S pour l'étude de la fiabilité des systèmes avec des données de fiabilité imprécises, également ils ont utilisé les algorithmes d'inférence des RB et la modélisation par fonctions de croyance dans [Simon and Weber, 2009b] pour l'évaluation de la fiabilité des systèmes multi-états.

Rakowsky [Rakowsky and Gocht, 2007] a modélisé les incertitudes dans la maintenance centrée sur la fiabilité (MCF). Des mesures de croyance et de plausibilité ont été utilisées pour exprimer les incertitudes d'experts dans le raisonnement. Cette approche a été appliquée à un système de détection et d'extinction d'incendie.

Dans les travaux de [Aguirre et al., 2011], [Sallak et al., 2010], une interprétation subjective de la théorie de Shafer-Dempster, un modèle de croyance transférable (MCT) a été utilisée pour modéliser la fiabilité avec la prise en compte des incertitudes épistémiques. Cette interprétation des modèles de croyance transférable, a été proposée par [Smets, 2008], [Sallak et al., 2010] fait une comparaison entre la simulation de Monte Carlo et les MCT. Cependant MCT permet plus de choix [Sallak et al., 2010]. Enfin, des croyances conditionnelles ont été définies, de manière analogue aux probabilités conditionnelles, et le théorème de Bayes Généralisé (GBT) est une extension du théorème de Bayes aux fonctions de croyance.

L'incertitude épistémique a été traitée dans [de Rocquigny et al., 2008], [Limbourg, 2008] comme probabilité subjective. Dans [Heard et al., 2006] et en phase de conception, la distribution et l'intervalle de confiance de la fonction de dé-fiabilité ont été trouvés par simulation numérique. Dans [Kochs et al., 2012], une probabilité a priori et la probabilité subjective ont été utilisées avec une probabilité empirique pour évaluer la fiabilité avec la prise en compte d'incertitude épistémique.

Les ingénieurs en fiabilité ont utilisé la théorie des probabilités pour répondre à cet enjeu, et au cours des dernières décennies, des théories alternatives ont été discutées (voir [Benferhat et al., 2010]). Ces théories permettent de représenter les incertitudes épistémiques (ou le manque de connaissances, des informations incomplètes, l'ambiguïté, etc.). Les théories d'incertitude les plus couramment utilisées dans les études de fiabilité sont les suivantes :

- Les probabilités imprécises [Walley, 1991],
- La théorie de Dempster-Shafer [Shafer, 1990] sous la forme de probabilités "inférieure et supérieure", théorie de la preuve, théorie des fonctions de croyance [Smets, 2008],
- La théorie de la possibilité [Dubois and Prade, 1988],
- Les ensembles flous.

5.5 L'approche globale d'évaluation de la fiabilité mécatronique incertaine

Nous avons présenté des notions sur les incertitudes et sur le traitement des incertitudes aléatoires et épistémiques dans les travaux sur l'évaluation de la fiabilité prévisionnelle des systèmes [Amrani et al., 2019b]. Néanmoins, nous n'avons pas trouvé de méthodologie qui permette l'évaluation des incertitudes épistémiques (de modèle et de paramètre) liées à la fiabilité des systèmes mécatroniques, avec la prise en compte des interactions multi-domaines. Nous proposons une approche globale pour l'évaluation de la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques, avec la prise en compte des interactions multi-domaines et des incertitudes épistémiques, décrite dans la figure 5.4:

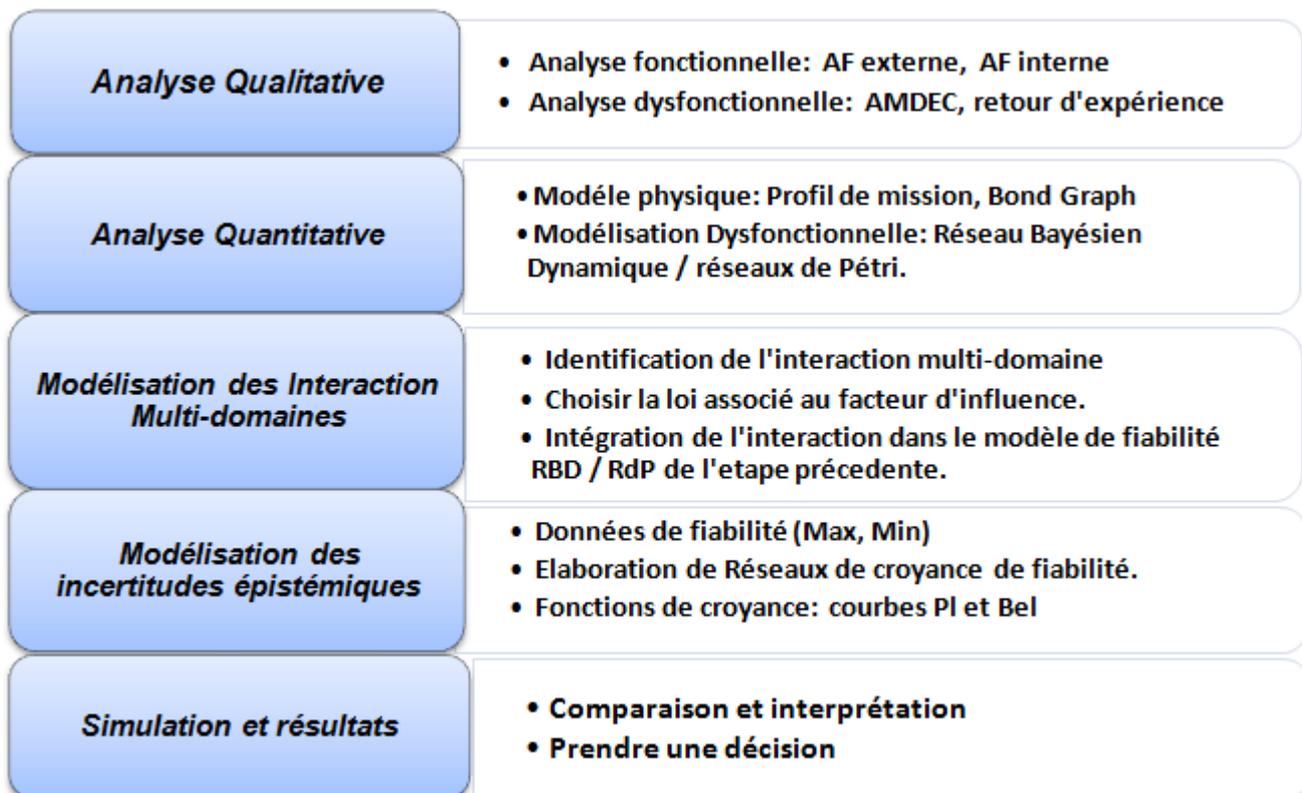


Figure 5.4: Méthodologie globale d'évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques

Cette démarche sera appliquée au même système "actionneur intelligent", en utilisant le modèle réseaux de fonction de croyance pour traiter les incertitudes épistémiques liées à la fiabilité, dans deux cas :

- Sans prise en compte de l'interaction multi-domaines «palier/bobine»,
- Avec prise en compte de l'interaction multi-domaines «palier/bobine ».

5.6 Réseaux de fonctions de croyance en fiabilité

5.6.1 Projection des fonctions de croyance en fiabilité

Dans le cadre probabiliste, le fonctionnement d'un système est caractérisé par des mesures de probabilités, le système ne peut avoir que deux types d'état : l'état de défaillance [Down] et l'état de fonctionnement [Up].

Pour les fonctions de croyance, le cadre de discernement est composé de deux possibilités : $\Omega = [Up, Down]$.

Ce cadre de discernement sert à élaborer des probabilités a priori sur l'état des composants et des probabilités a posteriori sur les états des sous-systèmes.

$$2^\omega = [(\phi); (Up), (Down), (Up, Down)] \quad (5.15)$$

- $m(\phi)=0$.
- $m(Up)$: masse de croyance que le composant est en état de fonctionnement,
- $m(Down)$: masse de croyance que le composant en état défaillant,
- $m(Up, Down)$: masse de croyance que le composant dans un des deux états précédents, ce qui décrit une ignorance qui représente l'incertitude épistémique.

Il s'agit d'affecter une valeur entre 0 et 1, indiquant un degré de croyance dans la fiabilité ; l'état du composant est en marche (Up), en défaillance (Down) ou entre les deux [Up, Down]. Alors la fiabilité $R_s(S = UP)$ du système est bornée par l'intervalle : [Bel, Pls].

$$Bel(A_i) < P(A_i) < Pls(A_i) \quad (5.16)$$

La différence $[Bel(A_i), Pls(A_i)]$ décrit l'incertitude épistémique concernant l'hypothèse considérée.

5.6.2 Réseau de Pétri Crédibilise

Nous avons également proposé l'utilisation des fonctions de croyance pour la prise en compte des incertitudes lors de l'évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques à l'aide de la modélisation par RdP, réseaux de Petri crédibiliste. La transformation du modèle RdP en modèle RdP à fonctions de croyance est faite de la même manière que la transformation du modèle RBD en modèle RBD utilisant des fonctions de croyance. Ce type de RdP à fonctions de croyance a été utilisé uniquement dans les travaux de [Rombaut et al., 1999] pour la reconnaissance des images et des formes. Nous avons proposé d'exploiter ce modèle pour le traitement des incertitudes dans l'estimation de la fiabilité.

Le réseau de Petri à fonctions de croyance (BPN : Belief Petri Net) est un graphe orienté, avec P places (équivalentes à des nœuds) et chaque transition est reliée au plus à une place amont et au plus une place aval [Amrani et al., 2017].

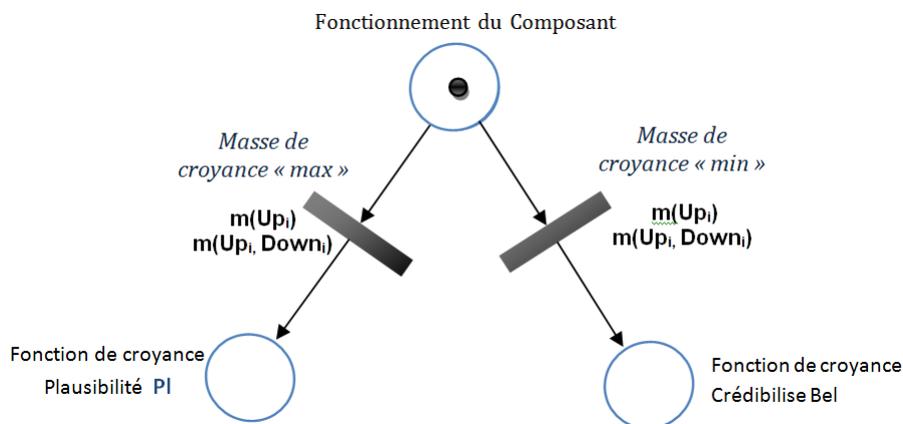


Figure 5.5: Réseau de Petri à fonctions de croyance proposé

Dans ce modèle, il s'agit de calculer à l'aide des croyances sur les transitions, la fonction de croyance sur l'ensemble des places à un instant donné t , à partir des croyances sur les places à t , conditionnées par les croyances sur les places à l'instant précédent (t_1).

Cadre de discernement

Les systèmes et les composants ont un seul mode de défaillance, noté $Down_s$ et un seul mode de fonctionnement, noté Up_s . Ω représente l'ensemble des états possibles d'un système :

$$\Omega_s = [Up_s, Down_s], \quad (5.17)$$

où Up_i et $Down_i$ représentent respectivement les états de défaillance et de fonctionnement du *composant* $_i$.

Affectation des fonctions de masses aux composants

Les données de fiabilité des composants sont basées sur l'avis des experts. Chaque expert donnera trois valeurs représentant son degré de croyance concernant le fonctionnement du composant i à un instant t .

Chaque composant i a ainsi comme cadre de discernement l'ensemble $i = [Up_i, Down_i]$, tel que :

$$m_{\Omega_i}(Down_i) = def_i \tag{5.18}$$

$$m_{\Omega_i}(Up_i) = fct_i \tag{5.19}$$

$$m_{\Omega_i}(Up_i, Down_i) = 1 - def_i - fct_i \tag{5.20}$$

Par exemple, si un expert estime que l'hypothèse que le composant A fonctionne à l'instant t est 60% vraie et 20% fausse, cet avis est exprimé par: $m1(Up_A) = 0,6$, $m1(Down_A) = 0,2$ et $m1(Up_A, Down_A) = 0,2$, car $m1(Up_A, Down_A) = 1 - m1(Up_A) - m1(Down_A)$.

Considérons un système [Sallak et al., 2010] cohérent, en configuration série (figure 5.6).

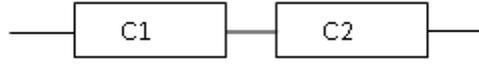


Figure 5.6: Exemple d'un système en série

Formellement, pour calculer la fonction de masse décrivant la fiabilité du système, il faut d'abord faire une extension vide des fonctions de masses de chaque composant à l'espace produit. Ensuite, il faut combiner ces masses avec la fonction de masse représentant le type de configuration en utilisant la règle de Dempster.

$$m^{\Omega_1 \Omega_2 \Omega_S} [(Up_1, Up_2, Up_S), (Up_1, Down_2, Down_S), (Down_1, Up_2, Down_S), (Down_1, Down_2, Down_S)] = 1 \tag{5.21}$$

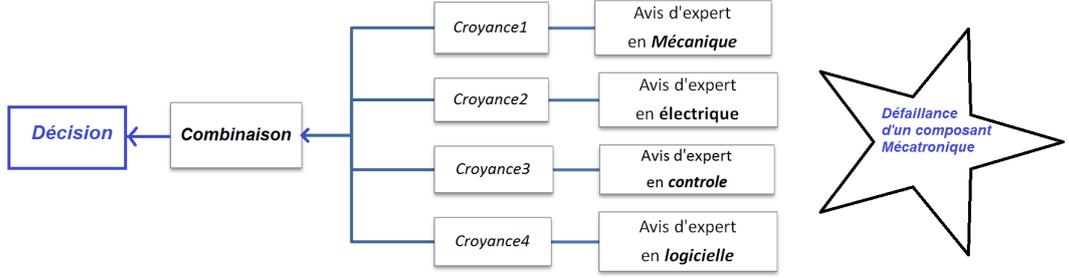


Figure 5.7: Réseaux de croyances

5.6.3 Élaboration des réseaux de croyances bayesiens

La modélisation de la fiabilité des systèmes est faite à l'aide d'arbres de défaillances et les relations logiques entre les composants sont converties en réseau équivalent en fonction de croyance (Figure 5.9) [Guth, 1991]. [Bobbio et al., 2001] propose l'utilisation des RB et des fonctions de croyance afin de prédire la fiabilité des systèmes, en remplaçant les tables de vérité des portes «ET» et «OU» par des tables 5.1 et 5.2 de masses de croyance «CMT».

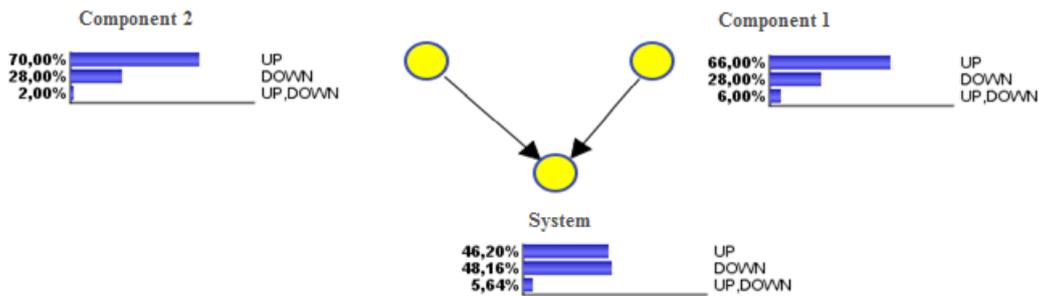


Figure 5.8: Exemple de réseaux de croyances

ET	Composant 2		
Composant 1	Up	Down	[Up, Down]
Up	Up	Down	[Up, Down]
Down	Down	Down	[Up, Down]
[Up, Down]	[Up, Down]	Down	[Up, Down]

Table 5.1: Table de masses de croyance : Porte ET

L'intérêt de cette méthode est de conserver le modèle RB, en le complétant par l'association aux nœuds du réseau Bayésien des masses de degré de croyance pour chaque état du composant (Up), ($down$) ou entre les deux $[Up, Down]$, masses représentées par une table des masses de croyance conditionnelles (MCC), qui remplace la table des probabilité conditionnelles (CPT). Cette adaptation est traitée par [Weber et al., 2012], [Coit et al., 2009], [Bobbio et al., 2001]. [Simon and Weber, 2009a] proposent de modéliser la fiabilité en fonction du temps et des incertitudes en utilisant les RBD et les FC, exprimant la dégradation de l'état du système et sa défaillance par des courbes des fonctions de masses Pl et Bel .

OU	Composant 2		
Composant 1	Up	Down	Up
Up	Up	Up	[Up, Down]
Down	Down	Down	[Up, Down]
[Up, Down]	[Up, Down]	[Up, Down]	[Up, Down]

Table 5.2: Table de masses de croyance : Porte OU

Dans un réseau de croyance dynamique, l'inférence est réalisée de la même manière que dans le RBD, en intégrant les incertitudes (figure 5.9).

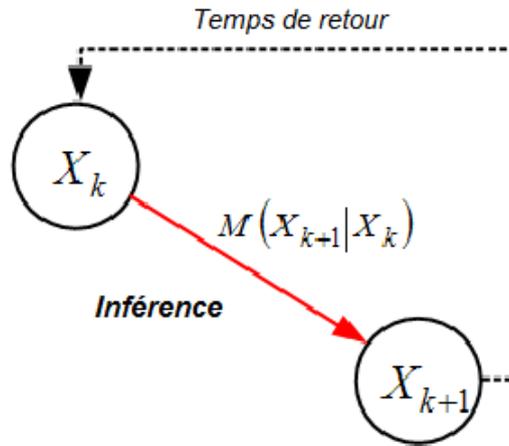


Figure 5.9: L'inférence dans les réseaux de croyances

Les tables des masses de croyance sont basées sur l'incertitude $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$, en permettant d'étudier les trois états des composants: $[Up]$; $[Down]$; $[Up, Down]$

$$P(X_{k+1}/X_k) = \begin{bmatrix} m(U^{k+1}/U^k) & m(D^{k+1}/U^k) & m((U, D)^{k+1}/U^k) \\ m(U^{k+1}/D^k) & m(D^{k+1}/D^k) & m((U, D)^{k+1}/D^k) \\ m(U^{k+1}/U, D^k) & m(D^{k+1}/(U, D)^k) & m((U, D)^{k+1}/(U, D)^k) \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

Tel que :

$$m(Down^{k+1}/Up^k) = \lambda_{max} \quad (5.23)$$

la masse de croyance associée à cette transition correspond au minimum de croyance que le composant tombe en défaillance (le composant est défaillant après la période de transition).

$$m((Up, Down)^{k+1}/Up^k) = \lambda_{max} - \lambda_{min} \quad (5.24)$$

La masse de transition correspond à l'incertitude sur l'hypothèse d'état du composant après la période de transition. Il y a une ambiguïté entre les hypothèses Up et Down.

$$m(Up^{k+1}/Up^k) = 1 - \lambda_{min} \quad (5.25)$$

La masse de croyance de cette transition correspond à la certitude de ne pas avoir de défaillance.

$$m(Down^{k+1}/(Up, Down)^k) = \lambda_{min} \quad (5.26)$$

Cette transition correspond au minimum de croyance que le composant est défaillant λ_{min} .

$$m(Up^{k+1}/(Up, Down)^k) = 0. \quad (5.27)$$

La matrice suivante représente la table des masses de croyance conditionnelles pour chaque composant :

$$M(X_{k+1}/X_k) = \begin{bmatrix} 1 - \lambda_{max} & \lambda_{min} & \lambda_{max} - \lambda_{min} \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & \lambda_{min} & 1 - \lambda_{min} \end{bmatrix} \tag{5.28}$$

5.6.4 Incertitude liée aux interactions multi-domaines

La figure 5.10 représente l'étape "Modélisation des incertitudes épistémiques".

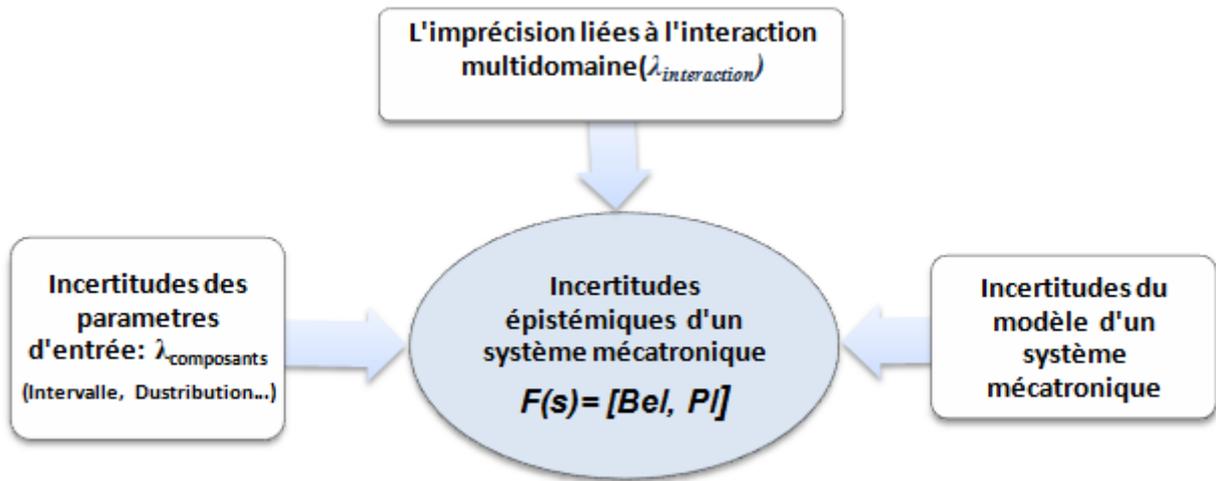


Figure 5.10: Approche pour intégrer les incertitudes épistémiques et les interactions multi-domaines

Les interactions sont définies comme une relation de cause à effet pour un mécanisme de défaillance de composant, où le facteur d'influence provient d'autres technologies 5.3. Ainsi, le taux de défaillance sera influencé par l'interaction multi-domaines.

Interaction Multi-domaine	Loi de stress	$\lambda_{Interaction-min}$	$\lambda_{Interaction-max}$
Température	Arrhenius Law	$\lambda_{Arrhenius-min}$	$\lambda_{Arrhenius-max}$
Humidité	Peck law	$\lambda_{Peck-min}$	$\lambda_{Peck-max}$
Electromigration	Black law	$\lambda_{Black-min}$	$\lambda_{Black-max}$
Supression	Power inverse law	$\lambda_{Powerinverse-min}$	$\lambda_{Powerinverse-max}$
Interactions multiple	Cox law	$\lambda_{Cox-min}$	$\lambda_{Cox-max}$

Table 5.3: Incertitudes du taux de défaillance liées à l'interaction multi-domaines

Pour représenter les incertitudes liées aux interactions multi-domaines, nous avons créé une nouvelle table de masse de croyance conditionnelle associée à la nouvelle liaison représentant l'interaction, en utilisant la même logique que dans la matrice des taux de défaillance et en ajoutant une condition d'existence de l'interaction, comme montré dans la table 5.4

X	Y	Up	Down	Up, Down
Up	Up	$1-\lambda_{refmax}$	$\lambda_{ref-min}$	$\lambda_{ref-max} - \lambda_{refmin}$
	Down	0	1	0
	Up-Down	0	$\lambda_{ref-min}$	$1-\lambda_{ref-min}$
Down	Up	$1-\lambda_{Interaction-max}$	$\lambda_{Interaction-min}$	$\lambda_{Interaction-max} - \lambda_{Interaction-min}$
	Down	0	1	0
	Up-down	0	$1-\lambda_{Interaction-min}$	$1-\lambda_{Interaction-min}$
Up-Down	Up	$1-\lambda_{Interaction-max}$	$1-\lambda_{Interaction-min}$	$\lambda_{Interaction-max} - \lambda_{Interaction-min}$
	Down	0	1	0
	Up-Down	0	0	1

Table 5.4: Table des masses de croyance du composant influencé

5.7 Application sur l'actionneur intelligent

Nous avons appliqué l'approche proposée sur l'"Actionneur Intelligent", système en configuration série, dans lequel à chaque transition est associé le BPA de chaque composant. Nous avons pris en compte les éléments suivant : la carte de commande et de diagnostic de l'actionneur, la carte de conditionnement de la sonde à effet Hall, la sonde à effet Hall, la bobine, l'inducteur avec aimant et le palier de guidage. Nous avons considéré l'imprécision concernant les taux de défaillance, avec les données des incertitudes épistémiques $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$ présentées dans la table 5.5.

Composant	λ_{min} (1/h)	λ_{max} (1/h)
Carte de commande	1.16 E-06	1.16 E-06
Carte de condit.	1.72 E-07	1.72 E-07
Bobine Électrique	5.10 E-05	5.10 E-05
Inducteur	5.10 E-05	5.60 E-05
Sonde à effet de Hall	1.21 E-07	1.21 E-07
Palier de guidage	MTTF= 1.31E+04 $\beta = 1.5$	MTTF= 1.3E+04 $\beta = 1.5$

Table 5.5: Taux de défaillance min-max des composants

Pour modéliser les incertitudes épistémiques, les taux de défaillance de chaque composant donnés par les experts sont exprimés sous forme d'intervalles $[\lambda_{min}, \lambda_{max}]$. Dans cette approche les *BPA*s des composants sont obtenues par les deux relations :

$$fct_i = 1 - \exp^{-\lambda_{min} \times t} \quad (5.29)$$

$$def_i = \exp^{-\lambda_{max} \times t} \quad (5.30)$$

La fiabilité R_s du système est bornée par l'intervalle $[Bel(U_{p_s}), Pl(U_{p_s})]$:

$$R_{systeme} = [Bel(U_{p_s}), Pl(U_{p_s})] \tag{5.31}$$

Tel que :

$$Bel(U_{p_s}) = \prod fct_i \tag{5.32}$$

$$Pl(U_{p_s}) = \prod (1 - def_i) \tag{5.33}$$

Ces formules sont généralisées pour des systèmes de n composants comme dans la table 5.6.

	Système en parallèle	Système en série
$BEL(U_{p_s})$	$1 - \prod [1 - m(U_{p_i})]$	$\prod [1 - m(U_{p_i})]$
$PL(W_s)$	$1 - \prod [1 - m(Down_i)]$	$\prod [1 - m(Down_i)]$

Table 5.6: Fonction de croyance pour des systèmes S/P

Le modèle RdP de croyance a été construit à l'aide de l'outil Petri Net V12 de la suite logicielle GRIF et est présenté dans la figure 5.11. Pour représenter les fonctions, on utilise « λ_{min} » pour la fonction BEL et « λ_{max} » pour la fonction PL. Pour représenter les probabilités de défaillance, la loi exponentielle est utilisée.

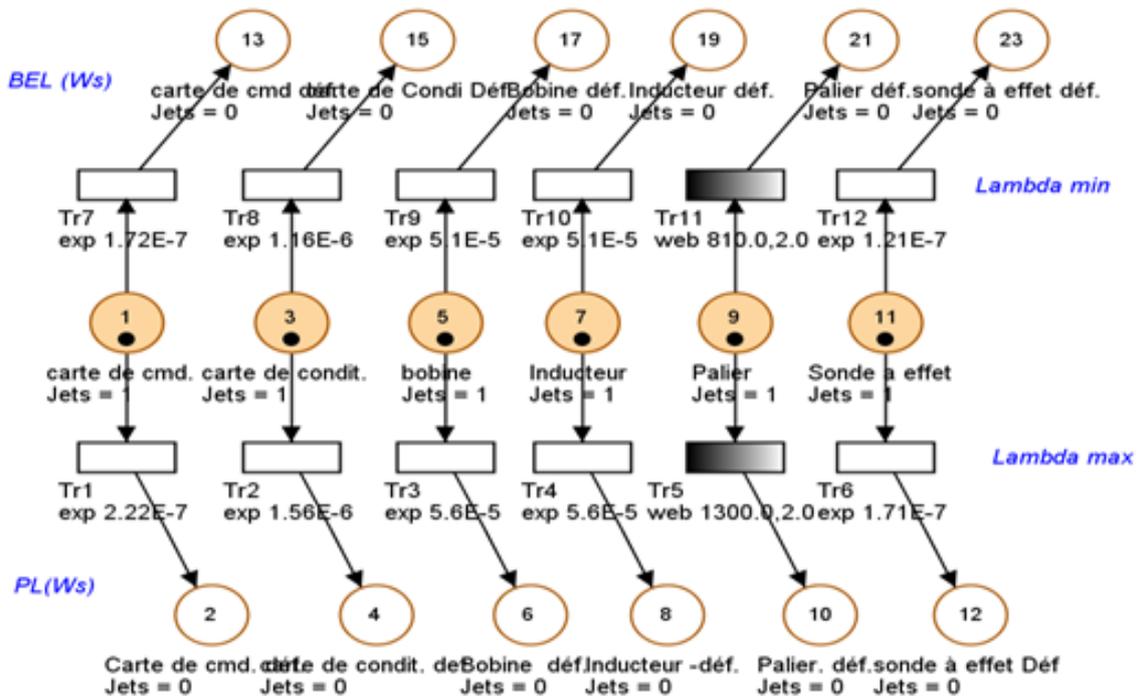


Figure 5.11: Modèle RdP de l'actionneur avec incertitudes des paramètres

Dans ce cas, les fonctions de croyances s'écrivent comme suit :

$$Bel(U_{p_s}) = \prod m(fct_i) = \prod (1 - \exp^{-\lambda_{min}t}) \quad (5.34)$$

$$Pl(U_{p_s}) = \prod (1 - def_i) = \prod (1 - \exp^{-\lambda_{max}t}) \quad (5.35)$$

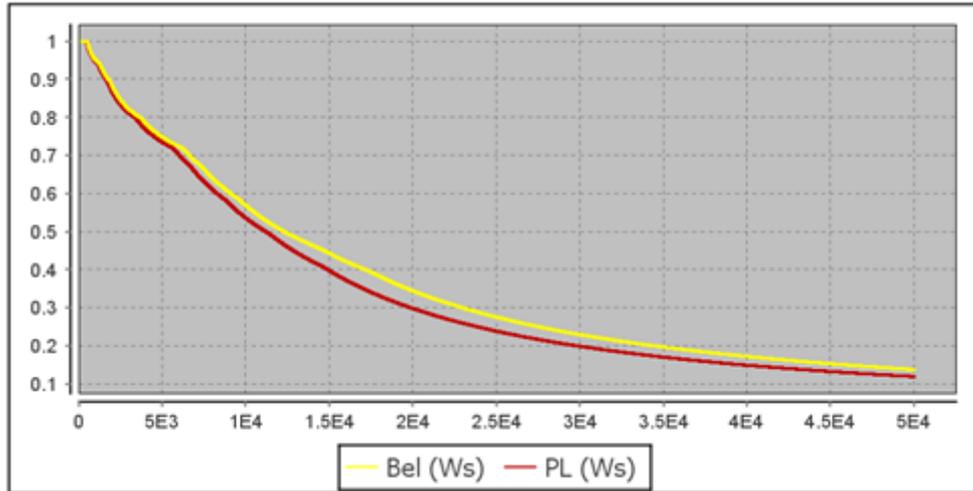


Figure 5.12: Fonctions Pl and Bel de l'actionneur sans interaction

Les résultats de simulation du modèle proposé (pour $t = 5000\text{heures}$) sont illustrés dans le graphe 5.12.

En prenant en compte les incertitudes paramétriques, la fiabilité du système actionneur intelligent est comprise entre la fonction de crédibilité Bel et la plausibilité PL. Par exemple, la fiabilité du système est $R = [0, 30; 0, 35]$ à $t = 20000\text{h}$.

5.7.1 Réseau de croyance pour l'actionneur avec et sans prise en compte de l'interaction

La simulation du modèle RBD a été faite sous le logiciel BAYESIA LAB V.06 ; dans cette simulation ont été pris en compte uniquement les composants liés à l'interaction multi-domaines, le palier de guidage et la bobine électrique.

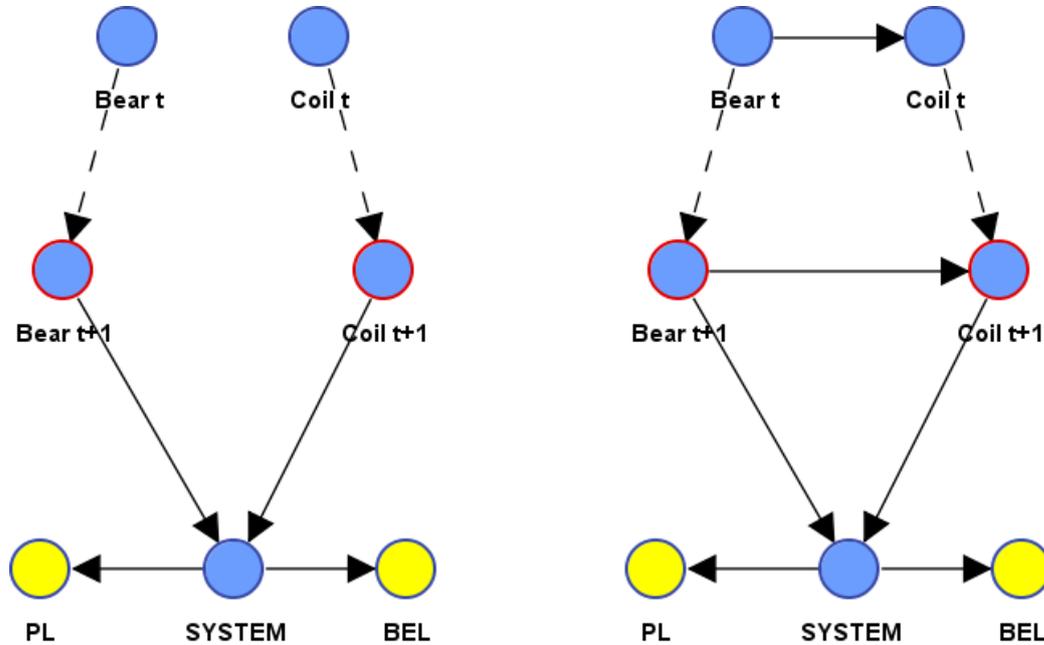


Figure 5.13: Réseau de croyance Bayésien dynamique de l'actionneur

Les composants sont considérés en série et la table CMT associée au nœud porte logique "ET" est présentée dans la table 4, avec l'intervalle $[Up, Down]$ pour chaque composant, afin de représenter l'incertitude épistémique traitée.

BEAR t+1	Coil t+1	UP	DOWN	UP-DOWN
Up	Up	1	0	0
	Down	0	1	0
	Up-Down	0	0	1
Down	Up	0	1	0
	Down	0	1	0
	Up-Down	0	1	0
Up-Down	Up	0	0	1
	Down	0	1	0
	Up-Down	0	0	1

Table 5.7: Table des masses conditionnelles du système

Création des fonctions "PL" et "Bel"

Afin de représenter les fonctions de croyance PL et Bel, les nœuds supplémentaires PL et Bel ont été ajoutés dans le réseau de croyance du système à étudier, noeuds dont les tables de masse sont les tables 5.8 et 5.9.

Système	Bel	Non Bel
Up	1	0
Down	0	1
Up-Down	1	0

Table 5.8: Table de masses conditionnelles de BEL

Système	Pl	Non Pl
Up	1	0
Down	0	1
Up-Down	0	1

Table 5.9: Table de masses conditionnelles de PL

Les table de masses conditionnelles (CMT) permettent de convertir les deux équations «2», et «3» des fonctions Bel et Pl en réseau Bayésien, en suivant le système en état (Up).

L'interaction palier/bobine

Après avoir modélisé une interaction multi-domaines comme facteur d'influence, il est nécessaire d'analyser la propagation de l'incertitude des paramètres liés à ce facteur d'influence vers une incertitude sur le taux de défaillance du composant associé, qui affectera la fiabilité du système. Un arc entre les éléments "palier" et "bobine" représente interaction multi-domaines. La prise en compte de l'interaction multi-domaines est faite en modifiant la table des masses conditionnelles CMT associée au nœud Bobine, composant influencé par cette interaction.

L'interaction multi-domaines traitée dans cette application est entre bobine électrique/support mécanique et est modélisée par la loi d'Arrhenius. L'incertitude est donc représentée par l'intervalle :

$$[\lambda_{Interaction-min}, \lambda_{Interaction-max}] = [\lambda_{Arrh-min}, \lambda_{Arrh-max}] \text{ Comme présenté dans le tableau 5.10:}$$

Bear	Coil	Up	Down	Up, Down
Up	Up	$1-\lambda_{refmax}$	$\lambda_{ref-min}$	$\lambda_{ref-max} - \lambda_{refmin}$
	Down	0	1	0
	Up-Down	0	$\lambda_{ref-min}$	$1-\lambda_{ref-min}$
Down	Up	$1-\lambda_{Arrh-max}$	$\lambda_{Arrh-min}$	$\lambda_{Arrh-max} - \lambda_{Arrh-min}$
	Down	0	1	0
	Up-own	0	$1-\lambda_{Arrh-min}$	$1-\lambda_{Arrh-min}$
Up-Down	Up	$1-\lambda_{Arrh-max}$	$1-\lambda_{Arrh-min}$	$\lambda_{Arrh-max} - \lambda_{Arrh-min}$
	Down	0	1	0
	Up-Down	0	0	1

Table 5.10: Table des masses conditionnelles de la bobine

5.7.2 Résultats

Les résultats de simulations des programmes BNT sous MATLAB 5.14, fournis en annexe 7.3 et 7.4 sont représentés par les courbes de crédibilité et de plausibilité dans les deux cas avec et sans prise en compte de l'interaction. À $t = 2000$ heures la fiabilité est comprise dans l'intervalle $R(t) = [Bel(WS), Pl(WS)] = [0.78, 9; 0.815]$, avec l'incertitude épistémique du système sans interaction de $m[Up, Downt = 1000] = 0, 03$.

À $t = 5000$ heures la fiabilité est dans l'intervalle $[0,31 ; 0,34]$, avec $m [Up, Down à t = 5000] = 0,023$, représentant l'incertitude épistémique du système avec interaction. La simulation faite pour 5000 heures

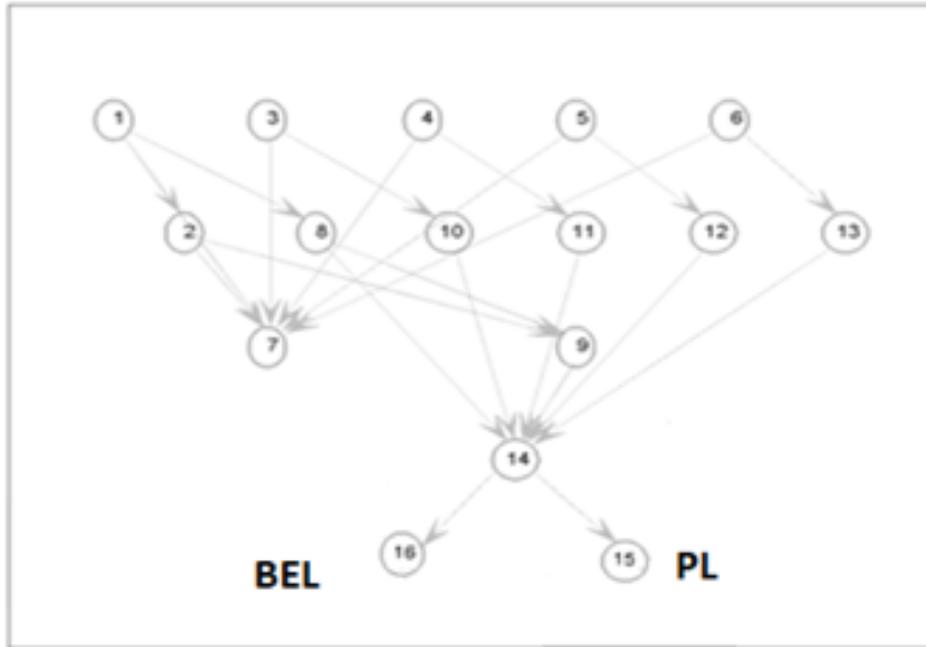


Figure 5.14: Réseau de croyance l'actionneur avec interaction sous BNT

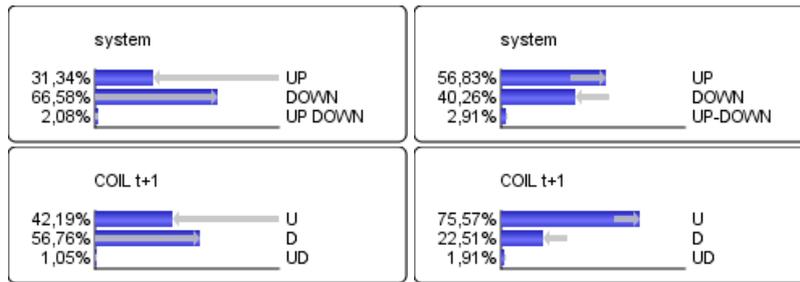


Figure 5.15: Valeur de Pl et Bel de la bobine électrique et le système

(environ 7 mois) sans prendre en compte l'interaction, montre que la fiabilité de «l'actionneur intelligent» est dans l'intervalle de [0,313; 0,334]. Les valeurs sont données dans la table suivante.

	BEL Function	PL Function
Sans interaction palier/bobine	0,568	0,597
Avec interaction palier/bobine	0,313	0,334

Table 5.11: Comparaison de la fiabilité du système à t = 5000 h pour les deux cas

Le RCD montre la propagation des incertitudes paramétriques et de l'imprécision de l'interaction palier/bobine (intervalle [Arrhenius/min; Arrhenius/max]) vers la fiabilité du système. La deuxième simulation montre la propagation des incertitudes de chaque composant à l'ensemble du système. Cette incertitude épistémique est illustrée par l'intervalle m (Système = (Up, Down)) = 0,02.

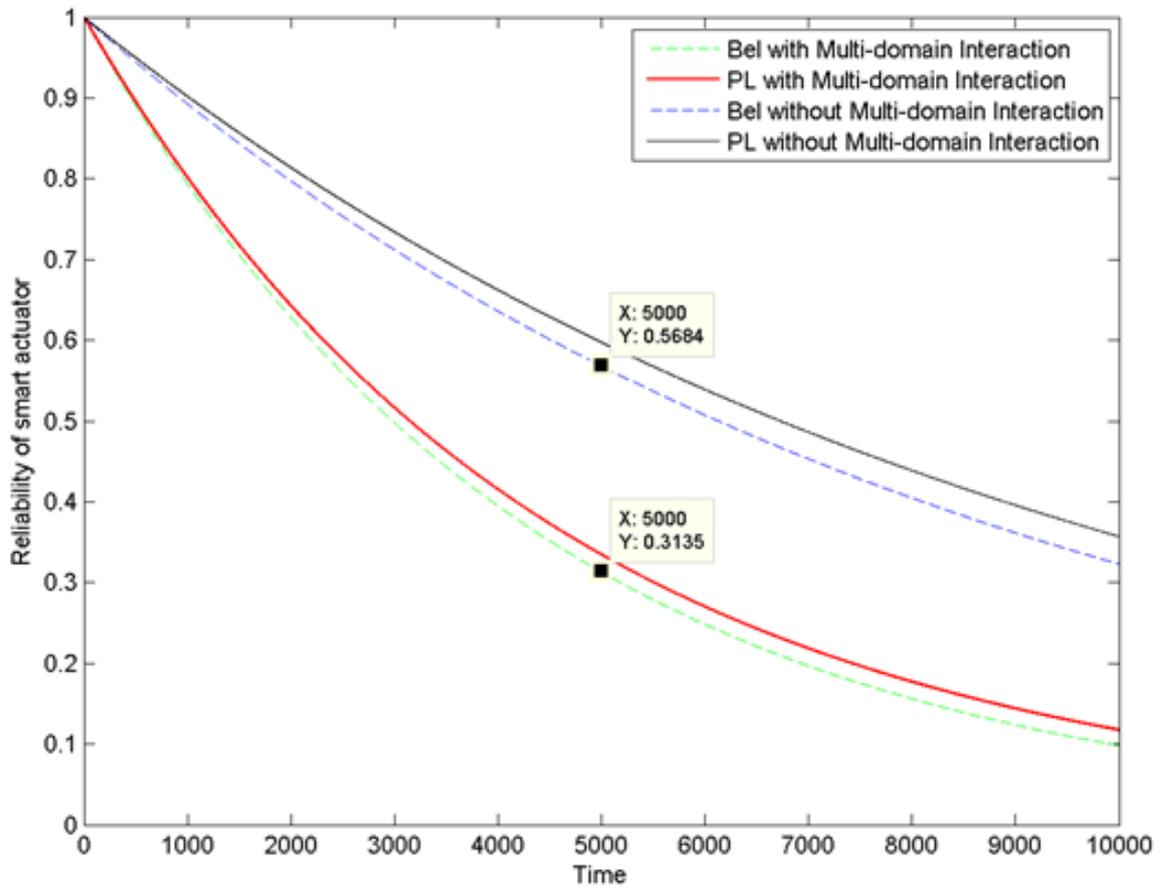


Figure 5.16: Comparaison des fonctions PL et Bel de fiabilité

5.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons proposé une méthode intégrant aux RBD les fonctions de croyance, afin de créer un réseau de croyance modélisant la fiabilité prévisionnelle d'un système mécatronique en prenant en compte les incertitudes des paramètres et de modèle de fiabilité. Les réseaux de croyance sont un cadre théorique permettant de traiter l'incertain, le cadre probabiliste s'avérant insuffisant pour les cas où les incertitudes épistémiques sont importantes. D'une part, les réseaux de croyance permettent d'appréhender facilement la logique causale d'un système, la fonction de structure exprimant la logique de propagation des défaillances au sein d'un système. D'autre part, la même modélisation permet l'étude de la propagation de l'imprécision (incertitude épistémique) et de l'incertitude liée à l'interaction multi-domaines au sein du même modèle en une seule étape. Le réseau de croyance dynamique construit pour évaluer la fiabilité de l'actionneur intelligent a permis de traiter les incertitudes paramétriques liées au manque des données pour les composants (taux de défaillance des composants incertains), ainsi que les incertitudes sur les modèles, y compris l'imprécision relative aux interactions multi-domaines (palier/bobine) et sa propagation. La distinction de cette incertitude de modèle suivant la considération de l'interaction multi-domaine peut permettre dans le cadre d'exploitation de résultats d'essais de confirmer ou non cette hypothèse.

Conclusion Générale

6.1 Résumé des contributions

L'objectif scientifique de cette thèse est de contribuer à l'évaluation de la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatronique en phase de conception. Afin d'y répondre, une méthodologie basée sur les outils existants (RBD, RdP et Fonctions de croyance) permet de traiter deux axes principaux dans lesquels le fiabiliste est confronté à deux situations critiques. Le premier est la prise en compte de l'existence des interactions multi-domaines lors d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle d'un système mécatronique. Le second traite de l'évaluation plus réaliste qui prend en considération les incertitudes épistémiques (de modèle et des paramètres), la méthodologie s'appuie sur les recueils des données pour chaque composant. En effet, elle permet de :

- Modélisation fonctionnelle et dysfonctionnel le du système mécatronique conçu;
- Analyse du système selon le Profil de de Mission;
- Modélisation d'un système mécatronique intégrant différentes technologies;
- Prise en considération de l'aspect dynamique hybride;
- Prise en compte de l'existence des interactions multi-domaines entre les entités du système;
- Prise en compte de l'aspect reconfigurable du système mécatronique;
- Modélisation des incertitudes épistémiques (incertitude de modèle et de paramètres).

Après avoir présenté brièvement le concept de système mécatronique et quelques exemples d'applications mécatroniques industrielles, nous avons introduit des définitions liées à la fiabilité, en plus des lois classiques de probabilité de défaillance utilisées. Nous avons présenté un état de l'art détaillé des travaux

existants dans le domaine de la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques, en précisant les verrous scientifiques à traiter dans la thèse.

- Notre première contribution est consacrée essentiellement à l'aspect interactif des systèmes mécatroniques, en formalisant une nouvelle méthodologie adaptée au traitement de cet aspect, et en modélisant l'interaction multi-domaines comme un facteur d'influence entre deux composants de technologies différentes, associé à une loi d'accélération. La méthodologie proposée a été appliquée à l'estimation de la fiabilité de l'actionneur intelligent, en considérant l'interaction multi-domaines entre la bobine électrique et le palier de guidage mécanique, en identifiant la température comme facteur d'influence sur la bobine.
- Cette modélisation a été faite à travers deux formalismes différents, en traitant les deux cas possibles (avec et sans prise en compte de l'interaction), avec la comparaison des résultats obtenus pour les deux cas. Le premier formalisme utilisé sont les réseaux Bayésiens dynamiques (RBD) et le deuxième les réseaux de Petri stochastiques, pour leur possibilités de représentation dynamique temporelle.

L'aspect probabiliste des réseaux Bayésiens ne permet pas la représentation dynamique des facteurs comme la température proportionnelle à la dégradation du palier ; nous avons utilisé des valeurs fixes pour les taux de défaillance de la bobine dans les deux cas (avec et sans prise en compte de l'interaction). Dans le modèle réseaux de Petri, l'effet de l'interaction sur l'état de la bobine a été représenté avec sa dynamique temporelle. Le formalisme RdP serait très intéressant pour le traitement de plusieurs interactions multi-domaines dans un même modèle.

- Dans une deuxième partie, nous nous sommes intéressés à la prise en considération des incertitudes épistémiques lors de l'évaluation de la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques et nous avons proposé d'utiliser les fonctions de croyance dans les réseaux Bayésiens afin de créer des réseaux de croyance. Les résultats obtenus par l'exploitation de ce modèle ont permis d'encadrer l'imprécision sur la probabilité de défaillance par les deux fonctions BL et PEL.

Un autre aspect à améliorer dans notre méthodologie est le développement d'une nouvelle approche pour la prise en compte de la reconfiguration dynamique des systèmes mécatroniques, cet aspect reconfigurable représente la capacité de système de s'adapter aux changements en fonction des facteurs internes et externes, et faire évoluer sa configuration et ajuster sa structure pour maintenir sa fonctionnalité. Un système reconfigurable s'adapte dynamiquement à des spécifications et permet également la prise en compte des spécifications incomplètes [Trabelsi et al., 2012], dont l'objectif est d'améliorer l'efficacité d'une architecture en permettant l'allocation et la réutilisation de ses ressources pour plusieurs tâches. Les études d'évaluation de fiabilité cités dans l'état de l'art, prennent en compte une seule configuration pour un système mécatronique, Pourtant cet aspect reconfigurable peut avoir une influence marquante sur les prévisions de fiabilité d'un système mécatronique en phase de conception. le développement de ce point est fait dans [Amrani et al., 2019c], et celui-ci nécessite à court terme une application réelle pour voir l'efficacité de l'approche proposée.

Les résultats décrits dans ce manuscrit nous ont amené à conclure que l'étude de la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques est une problématique complexe, loin d'être complètement résolue.

6.2 Perspectives

Selon leur faisabilité dans le temps, des perspectives existent à court terme et d'autres à long terme. Les perspectives à court terme nécessitent une réflexion immédiate sur la résolution de la problématique. Celles à long terme sont des perspectives qui peuvent être étudiées sur la durée. Bien que les résultats obtenus soient encourageants, un certain nombre de limites sont à citer.

- A court terme, dans l'application traitée, l'interaction palier/bobine a été identifiée par les experts de l'entreprise. Il serait intéressant de proposer une méthodologie pour l'identification des interactions multi-domaines, à partir de résultats d'essais de fiabilité ou d'un retour d'expérience, un test d'hypothèse et une éventuelle estimation.
- Afin de démontrer l'intérêt de la méthodologie proposée pour le traitement des interactions multi-domaines par rapport aux autres méthodologies, nous voulons valider son applicabilité dans des futurs travaux sur un autre système mécatronique dans le quel plusieurs interactions multi-domaines existent dans les deux sens entre différentes technologies.
- le traitement des interactions multi-domaines est récent, et il y a encore peu de travaux dans la littérature. A long terme, nous envisageons l'utilisation des Bond Graphs, outil performant en termes fonctionnels, recommandé pour la conception des systèmes mécatroniques. Plusieurs travaux présentent l'utilisation des Bond Graphs en diagnostic, pronostic et détection des défauts ; il serait intéressant de les utiliser dans le domaine de la fiabilité prévisionnelle, comme une représentation graphique d'échange de la puissance (effort, flux). Il est envisageable d'utiliser les Bond Graphs pour modéliser la dégradation des composants et représenter les interactions multi-domaines comme de nouveaux liens de transfert d'énergie, afin d'avoir un Bond Graph représentant les facteurs d'influence identifiés. Une autre possibilité serait d'utiliser conjointement les réseaux de Pétri et les Bond Graphs pour la modélisation dysfonctionnelle (actuellement, ce couplage est limité à une juxtaposition des modèles en version fonctionnelle). Cette approche pourrait être utilisée dans l'étude de la fiabilité des systèmes mécatroniques dans de futurs travaux.

Bibliography

- [Abdelkhalak and Bouchaïb, 2013] Abdelkhalak, E. H. and Bouchaïb, R. (2013). *Incertitudes, optimisation et fiabilité des structures*. Lavoisier. [23](#), [109](#)
- [Aguirre et al., 2011] Aguirre, F., Sallak, M., and Schön, W. (2011). Prise en compte des incertitudes dans les études de fiabilité: Comparaison entre le modèle de croyances transférables et les méthodes de simulations de monté-carlo. In *Qualita 2011*, page 80. [109](#), [118](#)
- [Aguirre et al., 2013] Aguirre, F., Sallak, M., Schön, W., and Belmonte, F. (2013). Application of evidential networks in quantitative analysis of railway accidents. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 227(4):368–384. [110](#)
- [Aguirrea et al.,] Aguirrea, F., Sallaka, M., and Schöna, W. Elicitation in reliability studies under epistemic uncertainty using the belief functions theory. [110](#)
- [Alla, 1987] Alla, H. L. (1987). *Réseaux de Petri colorés et Réseaux de Petri continus: application à l'étude des systèmes à évènements discrets*. PhD thesis, Grenoble INPG. [81](#)
- [Allegri and Zhang, 2008] Allegri, G. and Zhang, X. (2008). On the inverse power laws for accelerated random fatigue testing. *International Journal of Fatigue*, 30(6):967–977. [87](#)
- [Almond, 1995] Almond, R. G. (1995). *Graphical belief modeling*. CRC Press. [117](#)
- [Amrani et al., 2016a] Amrani, N., Saintis, L., and Barreau, M. (2016a). Prise en compte des interactions multi-domaines lors de l'évaluation de la fiabilité prévisionnelle des systèmes mécatroniques. *Congrès Lambda Mu 20 de Maîtrise des Risques et de Sûreté de Fonctionnement, 11-13 Octobre 2016, Saint Malo, France*. [83](#), [100](#)
- [Amrani et al., 2019a] Amrani, N. B., Saintis, L., Sarsri, D., and Barreau, M. (2019a). Dynamic bayesian network for reliability of mechatronic system with taking account the multi-domain interaction. *Journal of KONBiN*, 49(1):31–46. [98](#)
- [Amrani et al., 2019b] Amrani, N. B., Saintis, L., Sarsri, D., and Barreau, M. (2019b). Evidential networks for evaluating predictive reliability of mechatronics systems under epistemic uncertainties. *Journal of KONBiN*, 49(2):459–475. [119](#)
- [Amrani et al., 2019c] Amrani, N. B., Sarsri, D., Barreau, M., and Saintis, L. (2019c). Consideration of the reconfigurable aspect in evaluating predictive reliability of mechatronic system. In *MATEC Web of Conferences*, volume 286, page 05002. EDP Sciences. [134](#)

- [Amrani et al., 2016b] Amrani, N. B. S., Saintis, L., Barreau, M., and Sarsri, D. (2016b). Evaluating the predicted reliability of mechatronic systems: State of the art. *Mechanical Engineering: An International Journal (MEIJ)*, 3(2). 68
- [Amrani et al., 2017] Amrani, N. B. S., Saintis, L., Barreau, M., and Sarsri, D. (2017). Evaluation of the mechatronic systems reliability under parametric uncertainties. In *International Conference on Automation, Control Engineering and Computer Science (ACECS)*, volume 21. 121
- [Andrieu-Renaud et al., 2004] Andrieu-Renaud, C., Sudret, B., and Lemaire, M. (2004). The PHI2 method: a way to compute time-variant reliability. *Reliability Engineering & System Safety*, 84(1):75–86. 48, 55
- [Arifujjaman et al., 2009] Arifujjaman, M., Iqbal, M., and Quaicoe, J. (2009). Reliability analysis of grid connected small wind turbine power electronics. *Applied energy*, 86(9):1617–1623. 51
- [Aubry et al., 2012] Aubry, J.-F., Babykina, G., Barros, A., Brinzei, N., Deleuze, G., De Saporta, B., Dufour, F., Langeron, Y., and Zhang, H. (2012). Rapport final du projet APPRODYN : APPROches de la fiabilité DYNamique pour modéliser des systèmes critiques. Technical report. 46, 70
- [Aupetit et al., 2017] Aupetit, B., Batteux, M., Rauzy, A., and Roussel, J.-M. (2017). Safety analyzes of mechatronics systems: a case study. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1):11150–11155. 44
- [Babykina et al., 2012] Babykina, G., Brinzei, N., Aubry, J., and Castaneda, G. P. (2012). Reliability assessment for complex systems operating in dynamic environment. *Advances in Safety, Reliability and Risk Manag.* 46
- [Baroth, 2005] Baroth, J. (2005). *Analyse par éléments finis stochastiques de la propagation d'incertitudes dans un modèle mécanique non linéaire*. PhD thesis, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II. 49
- [Barreau et al., 2004] Barreau, M., Todoskoff, A., Mihalache, A., Guerin, F., and Dumon, B. (2004). Dependability assessment for mechatronic systems: electronic stability program (esp) analysis. In *International Conference on Advances in Vehicle Control and Safety-AVCS*. 55, 66, 67, 69, 70
- [Barreau et al., 2003] Barreau, M., Todoskoff, A., Morel, J.-Y., Guerin, F., and Mihalache, A. (2003). Dependability analysis of complex mechatronic systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 36(5):63–68. 15, 23, 54, 55, 56
- [Belhadaoui, 2011] Belhadaoui, H. (2011). *Conception sûre des systèmes mécatroniques intelligents pour des applications critiques*. phdthesis, Institut National Polytechnique de Lorraine - INPL. 23, 44, 46, 59, 66, 67, 71
- [Belhadaoui et al., 2007] Belhadaoui, H., Malassé, O., Aubry, J.-F., Idasiak, V., and Cassier, C. (2007). Outils d'aide à la conception de systèmes mécatroniques sûrs de fonctionnement. In Rufereq, editor, *7ème Congrès International Pluridisciplinaire Qualité et Sûreté de Fonctionnement, Qualita 2007*, pages 426–433, Tanger, Morocco. Rufereq. 15, 59, 60, 61

- [Benferhat et al., 2010] Benferhat, S., Dubois, D., Prade, H., and Annewilliams, M.-A. (2010). A framework for iterated belief revision using possibilistic counterparts to jeffrey’s rule. *Fundamenta Informaticae*, 99(2):147–168. [118](#)
- [Bishop, 2002] Bishop, R. H. (2002). *The Mechatronics Handbook, -2 Volume Set*. CRC press. [23](#)
- [Bobbio et al., 2001] Bobbio, A., Portinale, L., Minichino, M., and Ciancamerla, E. (2001). Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into bayesian networks. *Reliability Engineering & System Safety*, 71(3):249–260. [77](#), [117](#), [123](#)
- [Bobrowski et al., 2013] Bobrowski, S., Schinkoethe, W., Doering, M., and Jensen, U. (2013). Reliability prediction for mechatronic drive systems. In *Innovative Small Drives and Micro-Motor Systems, 2013. 9. GMM/ETG Symposium*, pages 1–6. VDE. [63](#), [66](#), [67](#)
- [Boudali and Dugan, 2005] Boudali, H. and Dugan, J. B. (2005). A discrete-time bayesian network reliability modeling and analysis framework. *Reliability Engineering & System Safety*, 87(3):337–349. [77](#)
- [Brams, 1983] Brams, G. (1983). *Réseaux de Petri: théorie et pratique*, volume 2. Masson. [79](#), [80](#)
- [Brissaud et al., 2007] Brissaud, F., Lanternier, B., Charpentier, D., and Lyonnet, P. (2007). Modélisation des taux de défaillance en mécanique - Combinaison d’une loi de Weibull et d’un modèle de Cox pour la modélisation des taux de défaillance en fonction du temps et des facteurs d’influence. In *Performances et Nouvelles Technologies en Maintenance, PENTOM 2007*, Mons, Belgium. [84](#), [88](#)
- [Broy et al., 2013] Broy, P., Hassane, C., Donat, R., Bérenguer, C., and Dijoux, Y. (2013). A new methodology to model and assess reliability of large dynamic hybrid systems. In *8th International Conference on Mathematical Methods in Reliability: Theory, Methods, Applications-MMR2013*, pages 28–32. [45](#)
- [Carey and Koenig, 1991] Carey, M. B. and Koenig, R. H. (1991). Reliability assessment based on accelerated degradation: A case study. *IEEE Transactions on Reliability*, 40(5):499–506. [86](#)
- [CHABOT et al., 2001] CHABOT, J.-L., DUTUIT, Y., and RAUZY, A. (2001). De l’usage de la simulation de monte-carlo couplée aux réseaux de petri en sûreté de fonctionnement. In *Proceedings of the MOSIM*, volume 1. [97](#)
- [Coit et al., 2009] Coit, D. W., Jin, T., and Tekiner, H. (2009). Review and comparison of system reliability optimization algorithms considering reliability estimation uncertainty. In *Reliability, Maintainability and Safety, 2009. ICRMS 2009. 8th International Conference on*, pages 49–53. IEEE. [123](#)
- [Coit et al., 2004] Coit, D. W., Jin, T., and Wattanapongsakorn, N. (2004). System optimization with component reliability estimation uncertainty: a multi-criteria approach. *IEEE transactions on reliability*, 53(3):369–380. [111](#)
- [Coulibaly and Ostrosi, 2011] Coulibaly, A. and Ostrosi, E. (2011). A framework for assessing the reliability of mechatronic systems. In *Global Product Development*, pages 663–673. Springer. [58](#), [66](#), [67](#)

- [Daniel and Descotes-Genon, 1995] Daniel, O. and Descotes-Genon, B. (1995). *Les réseaux de Pétri stochastiques pour l'évaluation des attributs de la sûreté de fonctionnement des systèmes manufacturiers*. PhD thesis, Grenoble INPG. [80](#), [81](#)
- [de Rocquigny et al., 2008] de Rocquigny, E., Devictor, N., and Tarantola, S. (2008). *Uncertainty in industrial practice: a guide to quantitative uncertainty management*. John Wiley & Sons. [117](#), [118](#)
- [de Vasconcelos et al., 2008] de Vasconcelos, M. C., Franco, D. T., Naviner, L. A. d. B., and Naviner, J.-F. (2008). Reliability analysis of combinational circuits based on a probabilistic binomial model. In *2008 Joint 6th International IEEE Northeast Workshop on Circuits and Systems and TAISA Conference*, pages 310–313. IEEE. [50](#)
- [Demmou et al., 2004] Demmou, H., Khalfaoui, S., Guilhem, E., and Valette, R. (2004). Critical scenarios derivation methodology for mechatronic systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 84(1):33–44. [23](#), [43](#)
- [Demri, 2009a] Demri, A. (2009a). *Contribution à l'évaluation de la fiabilité d'un système mécatronique par modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle*. PhD thesis, Université d'Angers. [15](#), [44](#), [46](#), [47](#), [54](#), [56](#), [57](#), [70](#), [71](#), [81](#)
- [Demri, 2009b] Demri, A. (2009b). *Contribution à l'évaluation de la fiabilité d'un système mécatronique par modélisation fonctionnelle et dysfonctionnelle*. phdthesis, Université d'Angers. [66](#), [67](#)
- [Demri et al., 2007] Demri, A., Charki, A., Guerin, F., Barreau, M., and Christofol, H. (2007). Fiabilisation d'un système mécatronique dès la phase de conception. *18ème Congrès Français de Mécanique (Grenoble 2007)*. [54](#), [55](#), [65](#), [82](#)
- [Dencœux, 2004] Dencœux, T. (2004). Théorie des fonctions de croyance et classification. *Séminaire, theme ASTRID, UTC*. [116](#)
- [Devictor, 1996] Devictor, N. (1996). *Fiabilité et mécanique: méthodes FORM/SORM et couplages avec des codes d'éléments finis par des surfaces de réponse adaptatives*. PhD thesis, Clermont-Ferrand 2. [48](#)
- [Dokouziannis and Kontoleon, 1988] Dokouziannis, S. and Kontoleon, J. (1988). Exact reliability analysis of combinational logic circuits. *IEEE transactions on reliability*, 37(5):493–500. [50](#)
- [Dorociak, 2012] Dorociak, R. (2012). Early probabilistic reliability analysis of mechatronic systems. In *Reliability and Maintainability Symposium (RAMS), 2012 Proceedings-Annual*, pages 1–6. IEEE. [62](#)
- [Dubois and Prade, 1988] Dubois, D. and Prade, H. (1988). Representation and combination of uncertainty with belief functions and possibility measures. *Computational intelligence*, 4(3):244–264. [118](#)
- [Dutuit et al., 1996] Dutuit, Y., Rauzy, A., SIGNORET, J.-P., and Thomas, P. (1996). Modélisation d'un système dynamique simple et évaluation de sa fiabilité par réseaux de petri stochastiques. In *Fiabilité & maintenabilité. Colloque national*, pages 648–659. [79](#), [81](#)

- [Duy and Duong, 2011] Duy, L. and Duong, T. (2011). *Traitement des incertitudes dans les applications des études probabilistes de sûreté nucléaire*. PhD thesis, Troyes. [16](#), [110](#), [111](#), [112](#)
- [El Hami et al., 2017] El Hami, A., Delaux, D., and Grzeskowiak, H. (2017). *Reliability of High-Power Mechatronic Systems I: Aerospace and Automotive Applications: Simulation, Modeling and Optimization*. Elsevier. [38](#)
- [El Hami and Pougnet, 2015] El Hami, A. and Pougnet, P. (2015). *Les systèmes mécatroniques embarqués I: Analyse des causes de défaillances, fiabilité et contraintes*, volume 1. ISTE Editions. [44](#), [59](#)
- [Elsayed, 2012] Elsayed, E. A. (2012). *Reliability engineering*, volume 88. John Wiley & Sons. [36](#), [38](#)
- [Felipe AGUIRRE MARTINEZ, 2012] Felipe AGUIRRE MARTINEZ (2012). *Reliability analysis of systems using belief functions theory to represent epistemic uncertainty*. PhD thesis, Univ. de Technologie de Compiègne. [110](#)
- [Fenton et al., 2008] Fenton, N., Neil, M., and Marquez, D. (2008). Using bayesian networks to predict software defects and reliability. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 222(4):701–712. [52](#)
- [Flaquer, 2011] Flaquer, J. T. (2011). *Méthodes probabilistes d'analyse de fiabilité dans la logique combinatoire*. PhD thesis. [50](#)
- [Foucher et al., 2002] Foucher, B., Boullie, J., Meslet, B., and Das, D. (2002). A review of reliability prediction methods for electronic devices. *Microelectronics reliability*, 42(8):1155–1162. [50](#), [51](#)
- [Franco et al., 2008] Franco, D. T., Vasconcelos, M. C., Naviner, L., and Naviner, J.-F. (2008). Signal probability for reliability evaluation of logic circuits. *Microelectronics Reliability*, 48(8-9):1586–1591. [50](#)
- [Gäng et al., 2007] Gäng, J., Bertsche, B., Wedel, M., and Göhner, P. (2007). Determining mechatronic system reliability using quantitative and qualitative methods. [61](#), [66](#), [67](#)
- [Gaudoin, 1990] Gaudoin, O. (1990). *Outils statistiques pour l'évaluation de la fiabilité des logiciels*. PhD thesis, Grenoble 1. [51](#)
- [Glesner et al., 2002] Glesner, M., Kirschbaum, A., Renner, F.-M., and Voss, B. (2002). State-of-the-art in rapid prototyping for mechatronic systems. *Mechatronics*, 12(8):987–998. [51](#)
- [Goel and Okumoto, 1979] Goel, A. L. and Okumoto, K. (1979). Time-dependent error-detection rate model for software reliability and other performance measures. *IEEE transactions on Reliability*, 28(3):206–211. [51](#)
- [Guérin et al., 2003] Guérin, F., Dumon, B., and Usureau, E. (2003). Reliability estimation by bayesian method: definition of prior distribution using dependability study. *Reliability Engineering & System Safety*, 82(3):299–306. [55](#), [62](#)

- [Guth, 1991] Guth, M. A. (1991). A probabilistic foundation for vagueness and imprecision in fault-tree analysis. *IEEE Transactions on Reliability*, 40(5):563–571. [117](#), [123](#)
- [Guérin et al., 2009] Guérin, F., Barreau, M., Todoskoff, A., Charki, A., Charrurau, S., and Berthon, J. (2009). Estimation de la fiabilité de composants aéronautiques. *Essais et Simulations*, 100:30–36. [53](#), [66](#), [67](#)
- [Habchi and Barthod, 2016] Habchi, G. and Barthod, C. (2016). An overall methodology for reliability prediction of mechatronic systems design with industrial application. *Reliability Engineering & System Safety*, 155:236–254. [46](#), [65](#), [66](#), [67](#), [92](#), [93](#), [95](#), [96](#)
- [Hallberg and Peck, 1991] Hallberg, Ö. and Peck, D. S. (1991). Recent humidity accelerations, a base for testing standards. *Quality and Reliability Engineering International*, 7(3):169–180. [87](#)
- [Han et al., 2011] Han, J., Chen, H., Boykin, E., and Fortes, J. (2011). Reliability evaluation of logic circuits using probabilistic gate models. *Microelectronics Reliability*, 51(2):468–476. [50](#)
- [Heard et al., 2006] Heard, G. W., Robertson, P., and Scroggie, M. P. (2006). Assessing detection probabilities for the endangered growling grass frog (*Litoria raniformis*) in southern victoria. *Wildlife Research*, 33(7):557–564. [118](#)
- [Huang, 2005] Huang, C.-Y. (2005). Performance analysis of software reliability growth models with testing-effort and change-point. *Journal of Systems and Software*, 76(2):181–194. [51](#)
- [Huang and Askin, 2003] Huang, W. and Askin, R. G. (2003). Reliability analysis of electronic devices with multiple competing failure modes involving performance aging degradation. *Quality and Reliability Engineering International*, 19(3):241–254. [51](#)
- [Idee and Pierrat, 2010] Idee, E. and Pierrat, L. (2010). Genèse et estimation d’un modèle de fiabilité en baignoire à taux de défaillance borné. [102](#)
- [Isermann, 2008] Isermann, R. (2008). Mechatronic systems—innovative products with embedded control. *Control Engineering Practice*, 16(1):14–29. [23](#), [27](#), [28](#)
- [Iturbe et al., 2010] Iturbe, X., Benkrid, K., Erdogan, A. T., Arslan, T., Azkarate, M., Martinez, I., and Perez, A. (2010). R3tos: A reliable reconfigurable real-time operating system. In *2010 NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems (AHS 2010)*, pages 99–104. IEEE. [47](#)
- [Jardin, 2010] Jardin, A. (2010). *Contribution à une méthodologie de dimensionnement des systèmes mécatroniques: analyse structurelle et couplage à l’optimisation dynamique*. PhD thesis, INSA de Lyon. [24](#), [27](#)
- [Jelinski and Moranda, 1972] Jelinski, Z. and Moranda, P. (1972). Software reliability research. In *Statistical computer performance evaluation*, pages 465–484. Elsevier. [51](#)

- [Johnson and Gullo, 2000] Johnson, B. G. and Gullo, L. (2000). Improvements in reliability assessment and prediction methodology. In *Reliability and Maintainability Symposium, 2000. Proceedings. Annual*, pages 181–187. IEEE. [50](#)
- [Khalifaoui, 2003] Khalifaoui, S. (2003). *Méthode de recherche des scénarios redoutés pour l'évaluation de la sûreté de fonctionnement des systèmes mécatroniques du monde automobile*. phdthesis, Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT. [23](#), [43](#), [54](#), [66](#), [67](#), [69](#), [70](#), [81](#), [82](#)
- [Khalifaoui et al., 2002] Khalifaoui, S., Guilhem, E., Demmou, H., and Valette, R. (2002). Une méthode pour obtenir des scénarios critiques dans les systèmes mécatroniques. In *Colloque Européen de Sûreté de Fonctionnement (lm13)*, volume 21, Palais des Congrès, Lyon, France. [44](#)
- [Khansa, 1997] Khansa, W. (1997). *Réseaux de Petri P-temporels: Contribution à l'étude des systèmes à événements discrets*. PhD thesis, Chambéry. [80](#)
- [Kochs et al., 2012] Kochs, H.-D., Kongniratsaikul, P., and Lutz, F. (2012). Comparing system reliability considering insufficient knowledge: Application to hvdc converter stations. In *Power and Energy Society General Meeting, 2012 IEEE*, pages 1–8. IEEE. [110](#), [111](#), [118](#)
- [Kopp et al., 2011] Kopp, M., Hofmann, D., Bertsche, B., Hej, C., Fritz, O., et al. (2011). Early reliability estimation in automotive industry. In *DS 68-10: Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED 11), Impacting Society through Engineering Design, Vol. 10: Design Methods and Tools pt. 2, Lyngby/Copenhagen, Denmark, 15.-19.08. 2011*, pages 270–277. [15](#), [53](#)
- [Langseth and Portinale, 2007] Langseth, H. and Portinale, L. (2007). Bayesian networks in reliability. *Reliability Engineering & System Safety*, 92(1):92–108. [78](#)
- [Laronde et al., 2010] Laronde, R., Charki, A., and Bigaud, D. (2010). Reliability of photovoltaic modules based on climatic measurement data. *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, 1(1):45–49. [15](#), [47](#), [54](#), [57](#), [81](#)
- [LARSSON, 2015] LARSSON, O. (2015). Reliability analysis. *LUND University*. [110](#)
- [Le Duy et al., 2010] Le Duy, T. D., Vasseur, D., Dieulle, L., Bérenguer, C., and Couplet, M. (2010). Representation of parameter uncertainty with evidence theory in probabilistic risk assessment. In *Proceeding of the Workshop on the Theory of Belief Functions, Brest, France*. [109](#)
- [Lebrun, 2003] Lebrun, M. (2003). *Simulation et CAO en automatique et mécatronique*. Ed. Techniques Ingénieur. [26](#), [27](#), [28](#)
- [Léger et al., 2010] Léger, M., Ledoux, T., and Coupaye, T. (2010). Reliable dynamic reconfigurations in a reflective component model. In *International Symposium on Component-Based Software Engineering*, pages 74–92. Springer. [47](#)
- [Lewis and Lewis, 1987] Lewis, E. E. and Lewis, E. E. (1987). *Introduction to reliability engineering*, volume 2. Wiley New York et al. [32](#)

- [Limbourg, 2008] Limbourg, P. (2008). *Dependability modelling under uncertainty*. Springer. 117, 118
- [Limbourg et al., 2008] Limbourg, P., Savić, R., Petersen, J., and Kochs, H. (2008). Modelling uncertainty in fault tree analyses using evidence theory. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 222(3):291–302. 117
- [Littlewood, 1979] Littlewood, B. (1979). The littlewood-verrall model for software reliability compared with some rivals. *Journal of Systems and Software*, 1:251–258. 51
- [Liu et al., 2015] Liu, Z., Li, D., Yun, L., and Xu, S. (2015). An assessment method for reliability of distributed control system. In *Information and Automation, 2015 IEEE International Conference on*, pages 1300–1304. IEEE. 52
- [Lyonnet et al., 2006] Lyonnet, P., Toscano, R., Maisonneuve, P., and Lanternier, B. (2006). Modélisation de la fiabilité des macro-composants mécanique à partir de modèles mathématiques et de réseaux de neurones, comparaisons des méthodes. pages 372–385, Montreal, Canada. 36, 84
- [Macias and Lemaire, 1997] Macias, O. F. and Lemaire, M. (1997). Eléments finis stochastiques et fiabilité: application en mécanique de la rupture. *Revue française de génie civil*, 1(2):247–284. 49
- [Mayo and Spanos, 2010] Mayo, D. G. and Spanos, A. (2010). *Error and inference: Recent exchanges on experimental reasoning, reliability, and the objectivity and rationality of science*. Cambridge University Press. 88
- [Medina-Oliva et al., 2013] Medina-Oliva, G., Weber, P., and Iung, B. (2013). Prm-based patterns for knowledge formalisation of industrial systems to support maintenance strategies assessment. *Reliability Engineering & System Safety*, 116:38–56. 78
- [Medjoudj, 2006] Medjoudj, M. (2006). *Contribution à l'analyse des systèmes pilotés par calculateurs: Extraction de scénarios redoutés et vérification de contraintes temporelles*. PhD thesis, Université Paul Sabatier-Toulouse III. 23, 44, 54
- [Meguetta et al., 2015] Meguetta, F. A. Z.-e., Conrard, S. B. B., and Bayart, T. C. M. (2015). Design of control system instrumentation using reliability criteria. *IFAC-PapersOnLine*, 48(21):1491–1496. 52
- [Melchers and Beck, 2018] Melchers, R. E. and Beck, A. T. (2018). *Structural reliability analysis and prediction*. John Wiley & Sons. 112
- [Mhenni, 2014] Mhenni, F. (2014). *Vers une approche intégrée d'analyse de sûreté de fonctionnement des systèmes mécatroniques*. PhD thesis, Châtenay-Malabry, Ecole centrale de Paris. 44
- [MIHALACHE et al., 2012] MIHALACHE, A., GUERIN, F., BARREAU, M., BACIVAROV, I., and BACIVAROV, A. (2012). Dependability estimation of mechatronic systems. *QUALITY and DEPENDABILITY*. 54, 69, 70

- [Mihalache et al., 2004] Mihalache, A., Guerin, F., Barreau, M., Todoskoff, A., and Dumon, B. (2004). Reliability assessment of mechatronic systems: operating field data analysis. In *Industrial Technology, 2004. IEEE ICIT'04. 2004 IEEE International Conference on*, volume 2, pages 1028–1033. IEEE. [82](#)
- [Mihalache, 2007] Mihalache, A. G. (2007). *Modélisation et évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques: application sur système embarqué*. PhD thesis, Université d'Angers. [15](#), [44](#), [46](#), [54](#), [55](#), [56](#), [57](#), [65](#), [66](#), [67](#), [81](#)
- [Mo and Chan, 2017] Mo, J. P. and Chan, D. (2017). Reliability based maintenance planning of wind turbine using bond graph. *Universal Journal of Mechanical Engineering*, 5(4):103–112. [64](#), [66](#), [67](#)
- [Moncelet et al., 1998a] Moncelet, G., Christensen, S., Demmou, H., Paludetto, M., and Porras, J. (1998a). Analysing a mechatronic system with coloured petri nets. *International Journal on Software Tools for Technology Transfer (STTT)*, 2(2):160–167. [43](#), [44](#)
- [Moncelet et al., 1998b] Moncelet, G., Porras, J., Christensen, S., Demmou, H., and Paludetto, M. (1998b). Application des réseaux de Petri colorés à l'évaluation de la sûreté de fonctionnement d'un système mécatronique automobile. pages 159–166. [23](#)
- [Mrad, 2015] Mrad, A. B. (2015). *Observations probabilistes dans les réseaux bayésiens*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis. [75](#)
- [Murphy et al., 2001] Murphy, K. et al. (2001). The bayes net toolbox for matlab. *Computing science and statistics*, 33(2):1024–1034. [103](#)
- [Musa et al., 1990] Musa, J. D., Iannino, A., and Okumoto, K. (1990). Software reliability. *Advances in Computers*, 30:85–170. [51](#)
- [Oberkampf et al., 2004] Oberkampf, W. L., Helton, J. C., Joslyn, C. A., Wojtkiewicz, S. F., and Ferson, S. (2004). Challenge problems: uncertainty in system response given uncertain parameters. *Reliability Engineering & System Safety*, 85(1-3):11–19. [112](#)
- [Omaña et al., 2004] Omaña, M., Rossi, D., and Metra, C. (2004). Model for transient fault susceptibility of combinational circuits. *Journal of Electronic Testing*, 20(5):501–509. [50](#)
- [Onwubolu, 2005] Onwubolu, G. C. (2005). *Mechatronics: principles and applications*. Elsevier. [24](#)
- [Pearl, 2011] Pearl, J. (2011). Bayesian networks. [74](#)
- [Peck, 1986] Peck, D. S. (1986). Comprehensive model for humidity testing correlation. In *24th International Reliability Physics Symposium*, pages 44–50. IEEE. [87](#)
- [Penas et al., 2011] Penas, O., Plateaux, R., Choley, J.-Y., Kadima, H., Sorinao, T., Combastel, C., and Riviere, A. (2011). *Conception mecatronique. Vers un processus continu de conception mecatronique integree*. PhD thesis, SUPMECA. [26](#), [27](#)

- [Perez Castaneda et al., 2008] Perez Castaneda, G. A., Aubry, J.-F., and Brinzei, N. (2008). Automate stochastique appliqué à l'évaluation de la fiabilité dynamique. In *7ème Conférence Internationale de Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes, MOSIM 08*, page CDROM, Paris, France. 45
- [Perez Castaneda et al., 2010] Perez Castaneda, G. A., Aubry, J.-F., and Brinzei, N. (2010). Modélisation d'un système par automate stochastique hybride pour l'évaluation de la fiabilité dynamique. *Journal européen des systèmes automatisés*, 44(2):229–253. 46
- [Pham, 2000] Pham, H. (2000). *Software reliability*. Springer Science & Business Media. 51
- [Pham, 2006] Pham, H., editor (2006). *Springer handbook of engineering statistics*. Springer, London. 51
- [Pham and Pham, 2001] Pham, L. and Pham, H. (2001). A bayesian predictive software reliability model with pseudo-failures. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans*, 31(3):233–238. 52
- [Phillips et al., 2015] Phillips, C. L., Nagle, T., Brickley, J., and Chakraborty, A. (2015). *Digital Control System Analysis & Design*. Pearson Higher Ed. 52, 109, 110
- [Priesterjahn et al., 2011] Priesterjahn, C., Sondermann-Wölke, C., Tichy, M., and Hölscher, C. (2011). Component-based hazard analysis for mechatronic systems. In *2011 14th IEEE International Symposium on Object/Component/Service-Oriented Real-Time Distributed Computing Workshops*, pages 80–87. IEEE. 61, 66, 67
- [Qi et al., 2005] Qi, Y., Gao, J., and Fortes, J. A. (2005). Markov chains and probabilistic computation—a general framework for multiplexed nanoelectronic systems. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 4(2):194–205. 50
- [Rakowsky and Gocht, 2007] Rakowsky, U. K. and Gocht, U. (2007). Modelling of uncertainties in reliability centred maintenance—a dempster-shafer approach. In *Proceedings of the European Conference on Safety and Reliability—ESREL 2007, Stavanger/Norway*. 118
- [Rejimon and Bhanja, 2005] Rejimon, T. and Bhanja, S. (2005). Scalable probabilistic computing models using bayesian networks. In *48th Midwest Symposium on Circuits and Systems, 2005.*, pages 712–715. IEEE. 50
- [Rombaut et al., 1999] Rombaut, M., Jarkass, I., and Denoeux, T. (1999). State recognition in discrete dynamical systems using petri nets and evidence theory. In *European Conference on Symbolic and Quantitative Approaches to Reasoning and Uncertainty*, pages 352–361. Springer. 121
- [Roy et al., 2015] Roy, P., Mahapatra, G., and Dey, K. (2015). Neuro-genetic approach on logistic model based software reliability prediction. *Expert systems with Applications*, 42(10):4709–4718. 51, 52
- [Sadou and Demmou, 2009] Sadou, N. and Demmou, H. (2009). Reliability analysis of discrete event dynamic systems with petri nets. *Reliability Engineering & System Safety*, 94(11):1848–1861. 45, 54, 82

- [Saintis et al., 2009] Saintis, L., Hugues, E., Bes, C., and Mongeau, M. (2009). Computing in-service aircraft reliability. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 16(02):91–116. [44](#)
- [Sallak et al., 2010] Sallak, M., Schön, W., and Aguirre, F. (2010). Transferable belief model for reliability analysis of systems with data uncertainties and failure dependencies. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 224(4):266–278. [109](#), [117](#), [118](#), [122](#)
- [Sanchez et al., 1999] Sanchez, E., Sipper, M., Haenni, J.-O., Beuchat, J.-L., Stauffer, A., and Perez-Uribe, A. (1999). Static and dynamic configurable systems. *IEEE transactions on Computers*, (6):556–564. [47](#)
- [Schoenig et al., 2006] Schoenig, R., Aubry, J.-F., Cambois, T., and Hutinet, T. (2006). An aggregation method of markov graphs for the reliability analysis of hybrid systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(2):137–148. [23](#), [44](#), [66](#), [67](#)
- [Shafer, 1976] Shafer, G. (1976). *A mathematical theory of evidence*, volume 42. Princeton university press. [113](#)
- [Shafer, 1990] Shafer, G. (1990). Perspectives on the theory and practice of belief functions. *International Journal of Approximate Reasoning*, 4(5-6):323–362. [109](#), [114](#), [115](#), [116](#), [118](#)
- [Sharma et al., 2010] Sharma, K., Garg, R., Nagpal, C., and Garg, R. (2010). Selection of optimal software reliability growth models using a distance based approach. *IEEE Transactions on Reliability*, 59(2):266–276. [51](#)
- [Sharma and Sharma, 2015] Sharma, R. K. and Sharma, P. (2015). Qualitative and quantitative approaches to analyse reliability of a mechatronic system: a case. *Journal of Industrial Engineering International*, 11(2):253–268. [23](#), [44](#), [53](#)
- [Simon and Weber, 2008] Simon, C. and Weber, P. (2008). Analyse de la fiabilité imprécise des systèmes par les réseaux de fonctions de croyance. In *4ème Journées Francophone sur les Réseaux Bayésiens*. [110](#)
- [Simon and Weber, 2009a] Simon, C. and Weber, P. (2009a). Evidential networks for reliability analysis and performance evaluation of systems with imprecise knowledge. *IEEE Transactions on Reliability*, 58(1):69–87. [109](#), [110](#), [117](#), [123](#)
- [Simon and Weber, 2009b] Simon, C. and Weber, P. (2009b). Imprecise reliability by evidential networks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 223(2):119–131. [109](#), [110](#), [117](#)
- [Siu, 1994] Siu, N. (1994). Risk assessment for dynamic systems: an overview. *Reliability Engineering & System Safety*, 43(1):43–73. [45](#)
- [Smets, 2008] Smets, P. (2008). Belief functions: the disjunctive rule of combination and the generalized bayesian theorem. In *Classic Works of the Dempster-Shafer Theory of Belief Functions*, pages 633–664. Springer. [114](#), [116](#), [118](#)

- [Song and Wang, 2012] Song, Y. and Wang, B. (2012). Survey on reliability of power electronic systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(1):591–604. [50](#)
- [Tebbi, 2005] Tebbi, O. (2005). *Estimation des lois de fiabilité en mécanique par les essais accélérés*. PhD thesis, Université d'Angers. [48](#), [101](#)
- [Thireau, 1986] Thireau, P. (1986). Méthodologie d'analyse des effets des erreurs logicielles (aeel) appliquée à l'étude d'un logiciel de haute sécurité. 5ième colloque international de fiabilité et de maintenabilité, Biarritz. [51](#)
- [Torres-Toledano and Sucar, 1998] Torres-Toledano, J. G. and Sucar, L. E. (1998). Bayesian networks for reliability analysis of complex systems. In *Ibero-American Conference on Artificial Intelligence*, pages 195–206. Springer. [77](#)
- [Trabelsi et al., 2012] Trabelsi, C., Meftali, S., and Dekeyser, J.-L. (2012). Distributed control for reconfigurable fpga systems: a high-level design approach. In *Reconfigurable Communication-centric Systems-on-Chip (ReCoSoC), 2012 7th International Workshop on*, pages 1–8. IEEE. [47](#), [134](#)
- [Turki, 2008] Turki, S. (2008). *Ingénierie système guidée par les modèles: Application du standard IEEE 15288, de l'architecture MDA et du langage SysML à la conception des systèmes mécatroniques*. PhD thesis, Université du Sud Toulon Var. [23](#), [26](#)
- [Utkin and Coolen, 2007] Utkin, L. V. and Coolen, F. P. (2007). Imprecise reliability: an introductory overview. In *Computational intelligence in reliability engineering*, pages 261–306. Springer. [109](#), [110](#)
- [Villemeur, 1992] Villemeur, A. (1992). *Methods and Techniques, Volume 1, Reliability, Availability, Maintainability and Safety Assessment*. John Wiley and Sons Ltd: London. [15](#), [32](#), [34](#), [43](#)
- [Walley, 1991] Walley, P. (1991). Statistical reasoning with imprecise probabilities. [110](#), [118](#)
- [Weber and Jouffe, 2003] Weber, P. and Jouffe, L. (2003). Reliability modelling with dynamic bayesian networks. In *In 5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes (SAFEPROCESS'03), Washington, DC, USA*, pages 57–62. IFAC. [62](#), [78](#)
- [Weber and Jouffe, 2006] Weber, P. and Jouffe, L. (2006). Complex system reliability modelling with dynamic object oriented bayesian networks (doobn). *Reliability Engineering & System Safety*, 91(2):149–162. [78](#), [89](#)
- [Weber et al., 2012] Weber, P., Medina-Oliva, G., Simon, C., and Iung, B. (2012). Overview on bayesian networks applications for dependability, risk analysis and maintenance areas. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 25(4):671–682. [62](#), [77](#), [78](#), [123](#)
- [Wedel and Göhner, 2006] Wedel, D.-I. M. and Göhner, H. (2006). Holistic qualitative and model-based reliability analysis of programmable mechatronic systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 39(16):91–96. [61](#)

- [Yang, 2007] Yang, G. (2007). *Life cycle reliability engineering*. John Wiley & Sons. [32](#), [34](#), [35](#)
- [Yang et al., 2017] Yang, J., Tan, S., and Suo, S. (2017). Methodology to evaluate reliability of performance of second-order automatic control system. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(4):1687814017699092. [52](#)
- [Yang et al., 2018] Yang, Y., Wang, H., Sangwongwanich, A., and Blaabjerg, F. (2018). Design for reliability of power electronic systems. In *Power electronics handbook*, pages 1423–1440. Elsevier. [50](#), [51](#)
- [You and Tonon, 2012] You, X. and Tonon, F. (2012). Event-tree analysis with imprecise probabilities. *Risk Analysis*, 32(2):330–344. [112](#)
- [Zaytoon et al., 2001] Zaytoon, J. et al. (2001). Systèmes dynamiques hybrides. *Hermes*. [46](#)
- [Zhong et al., 2010] Zhong, X., Ichchou, M., and Saidi, A. (2010). Reliability assessment of complex mechatronic systems using a modified nonparametric belief propagation algorithm. *Reliability Engineering & System Safety*, 95(11):1174–1185. [62](#), [66](#), [67](#), [78](#), [109](#)
- [Ziegler, 1996] Ziegler, C. (1996). *Sûreté de fonctionnement d'architectures informatiques embarquées sur automobile*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT. [23](#), [43](#)
- [Zouhal and Denoeux, 1998] Zouhal, L. M. and Denoeux, T. (1998). An evidence-theoretic k-nn rule with parameter optimization. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 28(2):263–271. [116](#)

Annexes

7.1 Programme BNT de la fiabilité sans la prise en compte de l'interaction multi-domaine

Création du Réseau RBD

```
intra = zeros(7) ;  
intra(31, 37) = 1 :Palier to system ;  
intra(A2, A7) = 1; Bobine to system ;  
intra(A3, A7) = 1; Carte de Commande to System ;  
intra(A4, A7) = 1; Carte de condit. to System ;  
intra(A5, A7) = 1; Sonde a effet Hall to System ;  
intra(A6, A7) = 1; Inducteur to systeme ;
```

Les relations temporelles

```
inter = zeros(7);  
inter(31, 31) = 1 Palier "T" au Palier "T+1"  
inter(A2, A2) = 1 Bobine "T" to Bobine "T+1"  
inter(A3, A3) = 1 Carte de Cmd "T" to Carte de Cmd "T+1"  
inter(A4, A4) = 1 Carte de condit "T" au Carte de condit "T+1"  
inter(A5, A5) = 1 Sonde "T" au Sonde "T+1"  
inter(A6, A6) = 1 Inducteur "T" au Palier "T+1"
```

Création du modèle RBD

```

ns = [2222222];
dnodes = 1 : 7;
bnet = mkdbn(intra, inter, ns, 'discrete', dnodes)

```

Taux de défaillance des composants

```

lambda_P = 0.00005: Palier
lambda_ref = 0.000051: Bobine
lambda_C1 = 0.00000017: Carte de Commande.
lambda_C2 = 0.00000116: Carte de condit.
lambda_I = 0.000051: Sonde
lambda_S = 0.000000121;: Inducteur.

```

CPT Noeud des composants en t

```

bnet.CPD31 = tabular_CPD(bnet, 1, 'CPT', [10]); Palier
bnet.CPDA2 = tabular_CPD(bnet, 2, 'CPT', [10]); Bobine
bnet.CPDA3 = tabular_CPD(bnet, 3, 'CPT', [10]); Carte de Cmd.
bnet.CPDA4 = tabular_CPD(bnet, 4, 'CPT', [10]); Carte de condit.
bnet.CPDA5 = tabular_CPD(bnet, 5, 'CPT', [10]); Sonde
bnet.CPDA6 = tabular_CPD(bnet, 6, 'CPT', [10]); Inducteur

bnet.CPDA7 = tabular_CPD(bnet, 7, 'CPT', [10 * ones(1, 63) 0ones(1, 63)]) : Noeud du système.

```

CPT Noeud des composants en t+1

```

bnet.CPD38 = tabular_CPD(bnet, 8, 'CPT', [1 - lambda_P 0 lambda_P 1]); Palier T+1
bnet.CPDA9 = tabular_CPD(bnet, 9, 'CPT', [1 - lambda_ref 0 lambda_ref 1]); Bobine T+1
bnet.CPDA10 = tabular_CPD(bnet, 10, 'CPT', [1 - lambda_C1 0 lambda_C1 1]) Carte de Cmd T+1
bnet.CPDA11 = tabular_CPD(bnet, 11, 'CPT', [1 - lambda_C2 0 lambda_C2 1]); Carte de Cmd T+1
bnet.CPDA12 = tabular_CPD(bnet, 12, 'CPT', [1 - lambda_I 0 lambda_I 1]) Sonde T+1
bnet.CPDA13 = tabular_CPD(bnet, 13, 'CPT', [1 - lambda_S 0 lambda_S 1]) Inducteur T+1

```

Inference algorithms

```

engine = jtree_dbn_inference(bnet)

```

Marginal distributions

```
temps = 50;
```

```
evidence = cell(7, temps);
```

```
    evidence(31, 31) = 1;
```

```
evidence(A2, A1) = 1;
```

```
evidence(A3, A1) = 1;
```

```
evidence(A4, A1) = 1;
```

```
evidence(A5, A1) = 1;
```

```
evidence(A6, A1) = 1;
```

```
evidence(A7, A1) = 1;
```

```
    proba_bup(A1) = 1;
```

```
    [engine, ll] = enter_evidence(engine, evidence);
```

```
    for i = 2 : temps
```

```
        marg = marginal_nodes(engine, A7, i);
```

```
        proba_bup(i) = marg.T(1, 1);
```

```
        marg = marginal_nodes(engine, 7, i);
```

```
        proba_Sup(i) = marg.T(1, 1);
```

```
    end
```

```
toc
```

```
plot(proba_bup)
```

```
plot(proba_Sup)
```

7.2 Programme BNT de la fiabilité avec la prise en compte de l'interaction multi-domaine

Création du Réseau RBD

```

intra = zeros(7);
intra(1,7) = 1; Palierausystem
intra(2,7) = 1; Bobineausystem
intra(1,2) = 1; Interaction" Palieraubobine
intra(3,7) = 1; CartedeCommandeauSystem
intra(4,7) = 1; Cartedecondit.auSystem
intra(5,7) = 1; Sondeaf fetHallauSystem
intra(6,7) = 1; Inducteurausysteme

```

Les relations temporelles

```

inter = zeros(7);
inter(1,1) = 1; Palier "T" au Palier "T+1"
inter(2,2) = 1; Bobine "T" au Bobine "T+1"
inter(3,3) = 1; CartedeCmD" T" au CartedeCmD" T + 1"
inter(4,4) = 1; Cartedecondit" T" au Cartedecondit" T + 1"
inter(5,5) = 1; Sonde" T" au Sonde" T + 1"
inter(6,6) = 1; Inducteur" T" au Palier" T + 1"

```

MODEL RBD

```

ns = [2222222];
dnodes = 1 : 7;
bnet = mkabn(intra, inter, ns, 'discrete', dnodes)

```

Taux de défaillance des composants

```

lambdaP = 0.00005 : Palier
lambdaref = 0.000051 : Bobine
lambdaC1 = 0.000000222 : CartedeCmd.
lambdaC2 = 0.0000016 : Cartedecondit.
lambdaI = 0.000051 : Sonde
lambdaS = 0.000000121 : Inducteur

```

7.2. PROGRAMME BNT DE LA FIABILITÉ AVEC LA PRISE EN COMPTE DE L'INTERACTION MULTI-DOM

$\lambda_{arrh} = 0.00017$: l'interaction P/B

CPT Noeud des composants en t

$bnet.CPD1 = \text{tabular}_{CPD}(bnet, 1, 'CPT', [10])$: Palier

$bnet.CPD2 = \text{tabular}_{CPD}(bnet, 2, 'CPT', [1010])$: Bobine

$bnet.CPD3 = \text{tabular}_{CPD}(bnet, 3, 'CPT', [10])$: Carte de Cmd.

$bnet.CPD4 = \text{tabular}_{CPD}(bnet, 4, 'CPT', [10])$: Carte de condit.

$bnet.CPD5 = \text{tabular}_{CPD}(bnet, 5, 'CPT', [10])$: Sonde

$bnet.CPD6 = \text{tabular}_{CPD}(bnet, 6, 'CPT', [10])$: Inducteur

$bnet.CPD7 = \text{tabular}_{CPD}(bnet, 7, 'CPT', [10 * \text{ones}(1, 63)$

$\text{ones}(1, 63)])$; Noeud du système.

CPT Noeud des composants en t+1

$bnet.CPD8 = \text{tabular}_{CPD}(bnet, 8, 'CPT', [1 - \lambda_P0\lambda_P1])$ Palier T+1

$bnet.CPD9 = \text{tabular}_{CPT}(bnet, 9, 'CPT', [1 - \lambda_{ref}01 - \lambda_{arh}0\lambda_{ref}1\lambda_{arh}1])$;

$bnet.CPD10 = \text{tabular}_{CPD}(bnet, 10, 'CPT', [1 - \lambda_C10\lambda_C11])$;

$bnet.CPD11 = \text{tabular}_{CPD}(bnet, 11, 'CPT', [1 - \lambda_C20\lambda_C21])$;

$bnet.CPD12 = \text{tabular}_{CPD}(bnet, 12, 'CPT', [1 - \lambda_I0\lambda_I1])$; Sonde T+1

$bnet.CPD13 = \text{tabular}_{CPD}(bnet, 13, 'CPT', [1 - \lambda_S0\lambda_S1])$; Inducteur T+1

Inference algorithms

$engine = \text{jtree}_{bn_i n_f} engine(bnet)$;

marginal distributions

$temps = 100$;

$evidence = \text{cell}(7, temps)$;

$evidence(1, 1) = 1$;

$evidence(2, 1) = 1$;

$evidence(3, 1) = 1$;

$evidence(4, 1) = 1$;

```
evidence(5, 1) = 1;
```

```
evidence(6, 1) = 1;
```

```
proba_Sup(1) = 1;
```

```
[engine, ll] = enter_evidence(engine, evidence);
```

```
for i = 2 : temps
```

```
  marg = marginal_nodes(engine, 7, i);
```

```
  proba_Sup(i) = marg.T(1, 1);
```

```
end
```

```
toc
```

```
plot(proba_Sup)G = bnet.dag;
```

7.3 Programme BNT de la fiabilité avec incertitude et sans interaction multi-domaine

Création du Réseau de croyance

$intra = zeros(6);$

$intra(1, 4) = 1;$ Palier to system

$intra(2, 4) = 1;$ Bobine to system

$intra(3, 4) = 1;$ Carte de Commande to System

$intra(4, 5) = 1;$ Function Beleif of system reliability

$intra(4, 6) = 1;$ Function Plausibility of system reliability

$inter = zeros(6);$

$inter(1, 1) = 1;$ Palier "T" to Palier "T+1"

$inter(2, 2) = 1;$ Bobine "T" to Bobine "T+1"

$inter(3, 3) = 1;$ Carte de CmD "t" to Carte de CmD "t+1"

Creation du MODEL

$ns = [333322];$

$dnodes = 1 : 6;$

$bnet = mk_{dbn}(intra, inter, ns, 'discrete', dnodes);$

Taux de défaillance des composants

$lambda_P = 0.00006;$ Palier

$lambda_{ref} = 0.0006;$ Bobine

$lambda_{C1} = 0.000000333;$ Carte de CmD

$lambda_{Pmin} = 0.00005;$ Palier

$lambda_{refmin} = 0.00051;$ Bobine

$lambda_{C1min} = 0.000000222;$ Carte de CmD

Table des masses de croyances des composants en t

$bnet.CPD1 = \text{tabular} - CPD(bnet, 1, 'CPT', [100]);$ Palier

$bnet.CPD2 = \text{tabular} - CPD(bnet, 2, 'CPT', [100]);$ Bobine

$bnet.CPD3 = \text{tabular} - CPD(bnet, 3, 'CPT', [100]);$ Carte de Cmd

$bnet.CPD4 = \text{tabular} - CPD(bnet, 4, 'CPT', [10 * \text{ones}(1, 26) 0101110101 * \text{ones}(1, 9) 0101110100010001010 * \text{ones}(1, 9) 101000101]);$ NOEUD SYSTEM

Function Beleif to system

$bnet.CPD5 = \text{tabular} - CPD(bnet, 5, 'CPT', [100011])$

Function Plausibility to system

$bnet.CPD6 = \text{tabular} - CPD(bnet, 6, 'CPT', [101010]);$

masse de croyance des composants

$bnet.CPD7 = \text{tabular}_{CPD}(bnet, 7, 'CPT', [1 - \lambda_{C1} 0 0 \lambda_{C1min} 1 0 \lambda_{C1} - \lambda_{C1min} 0 1]);$

$bnet.CPD8 = \text{tabular}_{CPD}(bnet, 8, 'CPT', [1 - \lambda_P 0 0 \lambda_{Pmin} 1 0 \lambda_P - \lambda_{Pmin} 0 1]);$

$bnet.CPD9 = \text{tabular}_{CPD}(bnet, 9, 'CPT', [1 - \lambda_{ref} 0 0 \lambda_{refmin} 1 0 \lambda_{ref} - \lambda_{refmin} 0]);$

Algorithms inference

$engine = \text{jtree}_{dbn};nfengine(bnet);$

distributions marginales

$temps = 10000;$

$evidence = \text{cell}(6, temps);$

$evidence(1, 1) = 1;$ etat intial de palier

$evidence(2, 1) = 1;$ etat intial Bobine

$evidence(3, 1) = 1;$ etat intial Carte de Cmd

$\text{probap}_{lup}(1) = 1;$

$\text{proba}_{belup}(1) = 1;$

$[engine, ll] = \text{enter}_{evidence}(engine, evidence);$

$\text{for } i = 2 : \text{temps}$

7.3. PROGRAMME BNT DE LA FIABILITÉ AVEC INCERTITUDE ET SANS INTERACTION MULTI-DOMAINES

```
marg1 = marginal_nodes(engine, 5, i);
```

```
marg2 = marginal_nodes(engine, 6, i);
```

```
probabelup(i) = marg1.T(1, 1);
```

```
probalup(i) = marg2.T(1, 1);
```

```
end
```

```
toc
```

```
plot(probalup, 'r');
```

```
hold on;
```

```
plot(probabelup, 'b - .');
```

7.4 Programme BNT de la fiabilité avec incertitude et l'interaction multi-domaine

Création du Réseau de croyance

```

intra = zeros(6);
    intra(1,4) = 1; Palier to system
intra(2,4) = 1; Bobine to system
intra(1,2) = 1; Interaction "Palier to bobine"
intra(3,4) = 1; Carte de Commande to System
intra(4,5) = 1; Function Beleif to system
intra(4,6) = 1; Function Plausibility to system

```

LES RELATIONS TEMPORELLES

```

inter = zeros(6);
inter(1,1) = 1; Palier "T" to Palier "T+1"
inter(2,2) = 1; Bobine "T" to Bobine "T+1"
inter(3,3) = 1; Carte de CmD "T" to Carte de CmD "T+1"

```

DBN MODEL

```

ns = [333322]; 2 pour BEL (believe/not believe) ET PL (pl/ not pl)
    dnodes = 1 : 6; bnet = mkabn(intra, inter, ns, 'discrete', dnodes);

```

tables masses de croyance es composants en t

```

bnet.CPD1 = tabularCPD(bnet, 1, 'CPT', [100]); Palier;
bnet.CPD2 = tabularCPD(bnet, 2, 'CPT', [100100100]); Bobine;
bnet.CPD3 = tabularCPD(bnet, 3, 'CPT', [100]); Carte de CmD
bnet.CPD4 = tabularCPD(bnet, 4, 'CPT', [10*ones(1, 26)0101110101*ones(1, 9)0101110100010001010*
ones(1, 9)101000101]); NOEUD du SYSTEM
bnet.CPD5 = tabularCPD(bnet, 5, 'CPT', [100011]) ; Function Beleif to system

    bnet.CPD6 = tabularCPD(bnet, 6, 'CPT', [101010]) ; Function Plausibility to system

```

tables masses de croyance des composants en t+1

$bnet.CPD7 = tabular_{CPD}(bnet, 7, 'CPT', [1 - \lambda_{C1} 0 0 \lambda_{C1min} 1 0 \lambda_{C1} - \lambda_{C1min} 0 1]);$

$bnet.CPD8 = tabular_{CPD}(bnet, 8, 'CPT', [1 - \lambda_P 0 0 \lambda_{Pmin} 1 0 \lambda_P - \lambda_{Pmin} 0 1]);$
palier T+1

$N_{pallier} = [1 - \lambda_P 0 0 \lambda_{Pmin} 1 0 \lambda_P - \lambda_{Pmin} 0 1];$

$bnet.CPD8 = tabular_{CPD}(bnet, 8, 'CPT', N_{pallier});$

$N_{bobine} = [1 - \lambda_{ref}, 0, 0, 1 - \lambda_{arrh}, 0, 0, 1 - \lambda_{arrh}, 0, \lambda_{refmin}, 1, \lambda_{refmin}$
 $\lambda_{arrhmin}, 1, \lambda_{arrhmin}, \lambda_{arrhmin}, 1, 0, \lambda_{ref} - \lambda_{refmin}, 0,$
 $1 - \lambda_{refmin}, \lambda_{arrh} - \lambda_{arrhmin}, 0, 1 - \lambda_{arrhmin}, \lambda_{arrh} - \lambda_{arrhmin}, 0, 1];$
bobine T+1

$bnet.CPD9 = tabular_{CPD}(bnet, 9, 'CPT', N_{bobine});$ bobine T+1

inference algorithms

$engine = jtree_{dbn;nf}engine(bnet);$

marginal distributions

temps=100;

$evidence = cell(6, temps);$

$evidence(1, 1) = 1;$ état initial de palier

$evidence(2, 1) = 1;$ état initial Bobine

$evidence(3, 1) = 1;$ état initial Carte de Cmd

$proba_{pup}(1) = 1;$

$proba_{belp}(1) = 1;$

$[engine, ll] = enter_evidence(engine, evidence);$

for $i = 2 : temps$

$marg1 = marginal_{nodes}(engine, 5, i);$

$marg2 = marginal_{nodes}(engine, 6, i);$

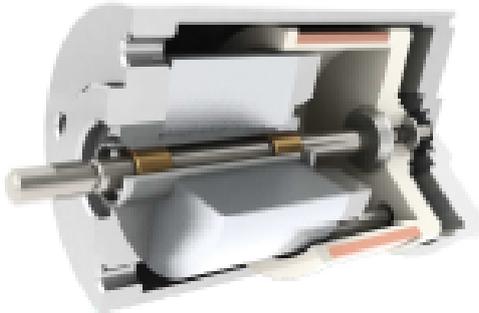
```
    probabelup(i) = marg1.T(1,1);  
probaplup(i) = marg2.T(1,1);  
  
    end toc  
    plot(probaplup,'r');  
hold on ;  
plot(probabelup,'b');
```

```
////////// Fin de Programme //////////
```

7.5 Fiche Technique de l'actionneur Pack'aero

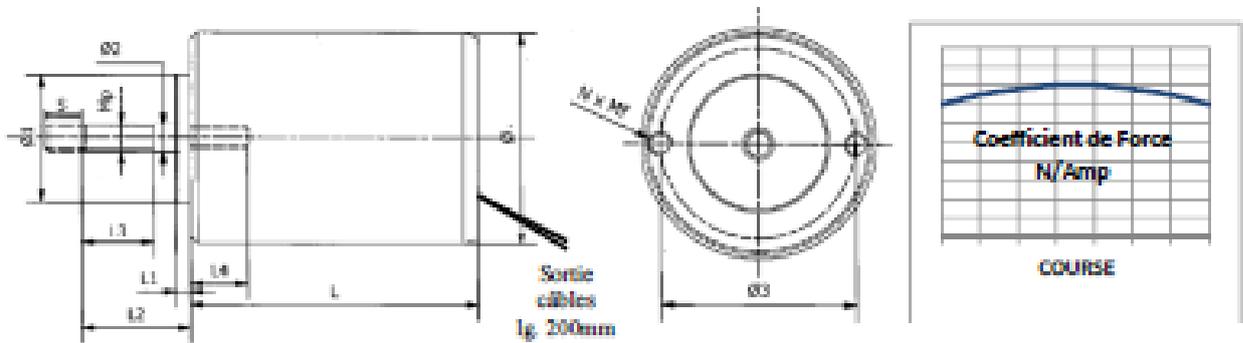


ACTIONNEUR LINEAIRE ELECTRODYNAMIQUE



Descriptif :

L'actionneur électrodynamique, appelé aussi Voice Coil, est constitué d'une bobine mobile dont le bobinage est traversé perpendiculairement par un flux magnétique fixe. Ce flux fixe B provient d'un circuit magnétique comportant un aimant de type Terre Rare. Lors du passage d'un courant I dans les spires L de la bobine, en réaction avec le flux magnétique selon la loi de Laplace $F=BLI$, il en résulte une force mécanique. Cette force est proportionnelle au courant et réversible en fonction de la polarité du courant dans la direction de l'axe. Cette technologie d'actionneur électrodynamique est utilisée pour un usage nécessitant un contrôle précis, une grande dynamique et un pilotage réversible. L'endurance mécanique est de plusieurs 100Millions de cycle.



Caractéristiques Dimensionnelles (en mm)

P/N	Ø	L	S	Ø1	Ø2	Mp	L1	L2	L5	L4	Ø3	N xM3
AE30-01-XX	30	40	6	15	4	M4	5	20	10	6max	23	4xM3
AE30-02-XX	30	56	12	15	4	M4	5	20	10	6max	23	4xM3
AE40-01-XX	40	42	6	20	4	M4	6	20	10	6max	30	4xM3
AE40-02-XX	40	58	12	20	4	M4	6	20	10	6max	30	4xM3
AE45-06-xx	45	55	6	20	4	M4	6	20	9	5max	30	4xM3
AE60-07-XX	60	100	6	35	6	M4	13	35	15	8max	45	4xM4
AE60-02-XX	60	100	24	35	6	M6	13	35	15	8max	45	4xM4
AE80-06-XX	80	120	12	45	15	M6	15	40	20	10max	62	4xM5
AE140-01-XX	140	260	24	60	16	M16	46	101	40	20	90	4xM10

Performances (non contractuel – pour étude préliminaire)

Référence	Diamètre (mm)	Course (mm)	Force Continue (N)	Puissance @ P(100%) (W)	Force Impulsionnelle @ 100% (N)	Puissance Impulsionnelle @ 100% (W)	Constante de Conversion (N/A)	Mécanisme Bobine (mm)	Coefficient de Force (N/A)	Constante Elastique (N/mm)	Masse Mobile (gr)	Masse Totale (gr)						
AE30-01-01	30	6	4	6	12,5	37	2	2,5	1,7	300	20	130						
AE30-01-02								5	4,5									
AE30-01-03								8	5,7									
AE30-02-01		12	4,3	6,5	13	40	2	2,5	1,7									
AE30-02-02								5	4,5									
AE30-02-03								8	5,7									
AE40-01-01	40	6	7	8	21	50	2,9	2,5	1,8	450	30	280						
AE40-01-02								5	4,5									
AE40-01-03								8	5,7									
AE40-02-01		12	8	9	25	57	3,3	2,5	1,7									
AE40-02-02								5	4,5									
AE40-02-03								8	5,7									
AE45-06-01	45	8	16	13	50	81	5,6	28,6	30	580	85	450						
AE60-07-01	60	8	42	23	130	144	10,8	2,5	1,7	1msec	115	1,5kg						
AE60-07-02								5	3,8									
AE60-07-03								25	17									
AE60-02-01								24	18				23	57	144	4,8	2,5	1,8
AE60-02-02																	5	4,5
AE60-02-03																	12	9,0
AE80-06-01	80	12	82	35	250	215	17	6,6	44	2,8msec	0,42kg	3kg						
AE140-01-01	140	24	260	87	800	540	34	1,4	89	4msec	2,2kg	21,8kg						

EN OPTION : Autres résistances de bobine 0,5 à 10KΩ - Intégration de ressort de rappel ou en opposition - Intégration d'un capteur de déplacement sans contact par sonde Hall

SUR DEMANDE : Autres dimensions (ex. Ø5 à Ø200mm) – autres courses (1 à 200mm) – autres formes (carré-cylindrique)

7.6 Données du retour d'expériences (REX)

La méthodologie d'estimation de la fiabilité opérationnelle s'appuie sur les données obtenues par retour d'expériences (*REX*).

Le *REX* vise une meilleure connaissance du comportement des composants, de leurs modes de dégradation, de dysfonctionnement ou d'endommagement. Il est basé sur la collecte et la gestion des faits techniques, observés pendant toute la durée de vie du système, de sa mise en service jusqu'à sa désintégration. Dans ce contexte, la constitution d'un échantillon correct de données pour l'estimation d'un modèle de vie d'un système passe par la reconstruction de l'histoire complète d'exploitation de ce système, pour une période d'observation déterminée. Plusieurs précisions sont à définir sur les données à collecter en exploitation :

- Systèmes qui font l'objet de cette collecte,
- Informations à collecter pour ces systèmes,
- Structure de données adoptée,
- Niveau de qualité souhaitable pour la collecte.

Exploitation des données du *REX* suppose trois phases :

- Sélection, parmi les systèmes suivis, d'un échantillon pertinent;
- Reconstruction de l'histoire de chaque matériel pris en compte;
- Calcul des temps jusqu'à la défaillance ou jusqu'à censure pour l'échantillon choisi.

La fonction de vraisemblance nécessite l'accès à des données de défaillances issues des banques de données de *REX*. Elle permet ainsi de déterminer la loi de fiabilité observée du système à partir des observations de défaillance.

En même temps, l'objectif du *REX* est l'amélioration de la qualité et de la fiabilité des systèmes et pour cet objectif le traitement de données brutes sera indispensable. La qualification et la validation de données du *REX* sont nécessaires avant tout calcul. Ces deux étapes représentent la tâche la plus difficile et la plus critique du *REX*, mais elles sont indispensables pour obtenir des résultats crédibles.

Les données nécessaires pour établir un échantillon pour construire la vraisemblance sont :

- Date de la mise en service du système,
- Dates de défaillances du système,
- Dates de censure, la fin d'observation des essais.

Toutes les banques de données du *REX* doivent permettre l'extraction de ces données. La construction d'un échantillon des données collectées par le *REX* pour estimer le modèle de vie associé au système passe par la valorisation de l'exploitation du système pendant une durée d'observation. Cette durée est plutôt courte afin de permettre le calcul de la fiabilité opérationnelle le plus vite possible. Contrairement aux données d'essais, la taille d'échantillon est souvent importante pour les données issues du *REX*.

7.7 Recueils de données de fiabilité électronique

Les recueils de données de fiabilité les plus connus pour des dispositifs électroniques et mécaniques sont présentés dans le tableau 7.1 . Ces recueils sont mis à jour régulièrement pour tenir compte des évolutions technologiques. En électronique, la durée de vie des données fournies par les recueils est relativement courte (de 3 à 6 ans) ; elle est plus longue en mécanique (de 30 à 40 ans).

Dans ce paragraphe nous indiquons les bases de données les plus utilisées pour des composants électroniques, elles sont regroupées dans le tableau suivant (tableau 7.1).

Source	Titre	Éditeur	Dernière version
FIDES	Méthodologie de fiabilité pour les systèmes électroniques	DGA-DM/STTC/CO/477	2004
IEEE STD	IEEE Guide to the collection and presentation of electrical, electronic sensing component and mechanical equipment reliability Data for nuclear power generating Station	Institut of Electrical and Electronic Engineers, New York, USA	IEEE STD 500, 1984
MIL-HDBK-217K	Military Handbook-Reliability Prediction of Electronic Equipment	United States Departement of defense	MIL-HDBK-217K,
BT-HRD	Handbook for Reliability Data	British Telecommunication	HRD5, 1995
EPRD	Electronic Part Reliability Data	Reliability Analysis Center, RAC, NEW YORK, USA	EPRD 97, 1997
GJB	Chinese Military Standar	Bejin Youtong Forever SCi-Tech	GJB/ Z229B, 1998
RDF(CENT)	Recueil de Données de fiabilité	Centre National d'études des Télécommunications, UTE, Paris? France	RDF 200-UTF. C80-810, Juillet 2000.
Telcordia Belcorde	Reliability Prediction Procedure for Electronic Equipment	Telcordia Technologies, New Jersey, UAE	Telcordia SR-332 Issue1, Mai 2001

Table 7.1: Table de Base de données de la fiabilité électronique

L'évaluation de la fiabilité prévisionnelle de composants électronique reste incontournable dans les études de la sûreté de fonctionnement et surtout dans les systèmes électroniques programmables, malgré les efforts fournis pour améliorer ou mettre à jour les bases de données classiques. Devant cet état de l'art, et depuis 2004 un consortium des grosses compagnies a proposé 7.2 comme une nouvelle référence pour le calcul de la fiabilité prévisionnelle des composants électroniques agissant sur la précision du calcul final du taux de défaillance:

Taux de défaillance Horaire	Mini	Moyen	Maxi	Rapport
Condensateur	1.10^{-8}	300.10^{-8}	1000.10^{-8}	1000
Diode Silicium	15.10^{-8}	154.10^{-8}	385.10^{-8}	26
Moteur C.A	15.10^{-8}	6700.10^{-8}	55600.10^{-8}	3700
Résistance à couche	2.10^{-8}	40.10^{-8}	100.10^{-8}	50
Relais	10.10^{-8}	2300.10^{-8}	25001.10^{-8}	1250
Tranistors	10.10^{-8}	730.10^{-8}	1700.10^{-8}	170

Table 7.2: Bases de données de la fiabilité électronique-Électrique

Ce tableau présent des résultats issus de différentes méthodes, c'est une analyse de sensibilité attachée à l'étude des taux de défaillances de base λ_0 de FIDES en les comparants aux autres guides récents RDF2000 [RDF 00] et PRISM [PRISM 00]. On constate que il est impossible de comparer les taux de défaillance de base directement car la philosophie de construction des modèles est différente et seule la comparaison du modèle complet est réalisable. Toutefois, il est intéressant de regarder les tendances.

7.8 Données de fiabilité pour des composants mécaniques

Les principales bases de données de fiabilité en mécanique sont présentées dans le tableau suivant (tableau 7.3)

Source	Titre	Éditeur	Dernière version
AVCP	Failure Rates	D. R. Earles M.F. Eddins AVCO Corporation, USA	Avril 1962
NPRD	Nanoelectronic Parts Reliability Data	Reliability Analysis Center, RAC, NEW YORK, USA	NPRD 97, 1997
NSWC	Handbook of reliability Prediction Procedure for Mechanical Equipment	Carederok Division, Naval Surface Warfare center United State Navy	NSWC-98/LEI 1998
EIREDA	European Reliability Industry Data Handbook	European Commission and EDF CRETE University PRESS	1998
FARADA	Failure Rates Data	GIPED Government Industry Data exchange Programm (USA)	MIL-STD-1556 B 24 Février 1986

Table 7.3: Bases de données de fiabilité mécanique

7.9 First and Second Order Reliability Method (FORM et SORM)

En fiabilité des structures , les méthodes FORM et SORM sont des méthodes d'approximation permettant de déterminer un point particulier appelé point de conception de la structure , et donc d'estimer la probabilité de défaillance P_f . Ces méthodes sont donc intrinsèquement liées à ce fameux point de conception ; Plus précisément à la distance qui sépare ce point à la surface de défaillance dans l'espace d'origine.

Cette distance est appelée en fiabilité : Indice de fiabilité ou de sécurité .

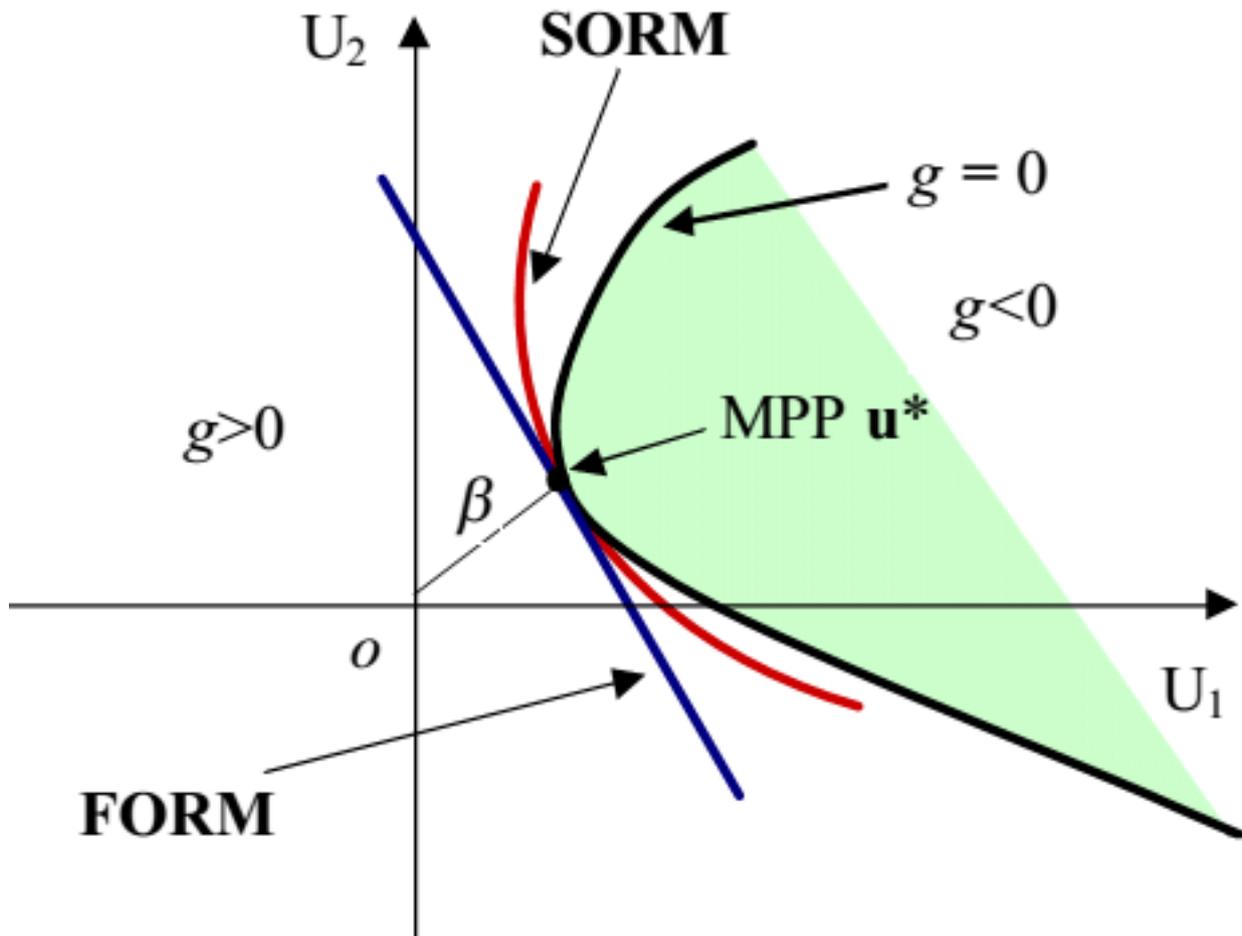


Figure 7.1: Méthode FORM/SORM pour la fiabilité des systèmes

7.9.1 Notion d'indice de fiabilité

Les indices de fiabilité permettent de rendre en compte la fiabilité d'un système et ainsi de les fiabilités de différentes structures. En effet , plus l'indice de fiabilité est élevé, plus la probabilité de défaillance est faible et par conséquent, plus la structure est fiable .

Il existe de ce fait plusieurs indices adaptés à différents types de surface de défaillance.

7.9.2 Indice de Cornell

Cet indice a été introduit par **Cornell en 1969**. Il est adapté à une surface de défaillance hyperplane. Il est défini en termes de marge de sécurité M à partir de la valeur moyenne $E[M]$.

Avec $M = G(Y)$, Y est le vecteur des variables de base, G la fonction de défaillance du modèle étudié et $Var(M)$ est la variance de la marge de sécurité.

On fixe comme critère de défaillance $M = G(Y) < 0$ l'indice de Cornell est défini par :

$$\beta = \frac{E(M)}{\sigma(M)} \quad (7.1)$$

Dans le cas unidimensionnel, la surface de rupture est représentée par le point $M = 0$. L'idée exprimée par cette définition de l'indice de fiabilité est que la distance de la valeur moyenne $E(M)$ à la surface de rupture (exprimée en nombre d'écart types) donne une bonne mesure de la fiabilité.

Si la fonction d'état limite $G(Y)$ est linéaire, alors $E(M)$ et $Var(M)$ peuvent être calculées facilement en fonction des caractéristiques des variables de base.

Dans le cas où $G(Y)$ n'est pas linéaire, Cornell suggère de l'approcher par son développement de Taylor au premier ordre au point moyen. Cette évaluation ne nécessite pas la connaissance des deux premiers moments des variables aléatoires.

On peut également avoir recours aux simulations de Monte Carlo pour des formes complexes et non explicites de la fonction de défaillance $G(Y)$. Avec un nombre relativement restreint de simulations, on obtient en générale de bonnes estimations de $E(M)$ et de $Var(M)$.

7.9.3 Indice de fiabilité du premier ordre β_{FO}

Il s'agit d'un indice introduit en 1967 par **Rosenbleuth et Esteva**, Il s'applique à des surfaces de défaillance linéaires pour les quelles l'indice de Cornell n'est pas adaptée.

L'idée consiste à linéariser la marge de sécurité par un développement de Taylor d'ordre 1 en un point y . La marge linéarisée est notée M_{FO} , et l'indice de fiabilité du premier ordre β_{FO} . On a donc :

$$M_{FO} = G(y) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial G}{\partial y_i}(y)(Y_i - y_i)$$

$$\beta_{FO} = \frac{G(y) + \sum_{i=1}^n \frac{\partial G}{\partial y_i}(y)(E(Y_i) - y_i)}{\left| \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial G}{\partial y_i}(y) \frac{\partial G}{\partial y_j}(y) (Cov(Y_i, Y_j)) \right|^{1/2}} \quad (7.2)$$

A noter que lorsque le point de linéarisation est la moyenne, l'indice est appelée indice de fiabilité du second moment du premier ordre de la valeur moyenne .

7.9.4 Indice de Hasofer-Lind β_{HL}

Cet indice a été introduit en 1974 par **Hasofer et Lind** ; Ils ont proposée une définition basée sur l'interprétation géométrique de β_c ; En effet , l'indice de Hasofer-Lind est considéré comme la plus petite distance (au sens euclidien) de l'origine jusqu'à la surface de défaillance dans l'espace standard; On a donc :

(7.3)

$$\beta_{HL} = \underset{G_X(x)=0}{\text{Min}} (x^t x)^{1/2}$$

$$\beta_{HL} = \underset{G(y)=0}{\text{Min}} [(y - E(Y))^t C_Y^{-1} (y - E(Y))]^{1/2}$$

Il est à noter que le point solution du problème $\text{Min} (X^t X)^{1/2}$ est fondamental dans l'étude des méthodes FORM et SORM ; Il est appelé Design point ou point de conception de la structure.

Il s'agit du point appartenant à la surface de défaillance pour lequel la densité conjointe des variables est la plus élevée est le point de défaillance le plus probable de la structure. Nous le développerons davantage plus tard .

7.9.5 Indice de Fiabilité Généralisé

Un nouvel indice de fiabilité généralisé a été développé par **DITLEVSEN**, Ce nouvel indice est beaucoup plus précis ; Il s'agit en effet d'une fonction de la probabilité de défaillance exacte lorsque les variables sont indépendantes centrées réduites.

Malheureusement le calcul de cet indice nécessite une intégration sur le domaine de fiabilité qui peut s'avère longue et difficile.

L'indice de fiabilité une fonction monotone croissante de la fiabilité:

(7.4)

$$\beta_G = \varphi^{-1}(\gamma) = -\varphi^{-1}(P_F) \quad \text{avec } P_F = 1 - \gamma$$

7.10 Approche probabiliste de “Contrainte-Résistance

L’approche probabiliste de la méthode “ Contrainte-Résistance” est largement utilisée dans plusieurs laboratoires de mécanique ([Afnor, 1981], [Catuneau and Mihalache, 1989], [Doyle, 1992], [Ligeron, 1979], [McInn, 1998], [Procaccia and Morilhat, 1996], [Salzman et al., 2003], [Villemeur, 1988],...), plusieurs logiciels ont été développés pour la minimisation des temps de calcul dans l’optimisation mécano-fiabiliste des structures mécaniques qui est indispensable pour concevoir des systèmes de plus en plus performants.

Cette approche est composée de quatre parties principales: une première partie d’analyse préliminaire de la structure à étudier, une deuxième partie d’analyse mécanique basée principalement sur la construction d’un modèle mécanique explicite traduisant la réponse de la structure par rapport à divers scénarios de défaillance, la troisième partie d’analyse statistique formée d’un ensemble d’outils statistiques permettant le calcul de la probabilité de défaillance, à ces trois parties s’ajoute une dernière étape très importante celle de l’analyse critique des résultats qui nous permet de juger la crédibilité et la conformité des résultats obtenus.

Les modèles intervenant dans les trois parties de la démarche probabiliste nécessitent la mise en œuvre de techniques spécifiques pour leur validation et le calage de paramètres à partir de données expérimentales.

7.10.1 Étapes de la méthode

Analyse préliminaire

Paramètres de dimensionnement (les variables de conception)

Les informations disponibles à la conception et nécessaires pour aborder les prévisions de la fiabilité peuvent être répertoriées suivant leur origine, comme suit:

Aléas internes: relatifs à l’état de la structure :

- Contraintes de fonctionnement (forces internes, mouvement. . .)
- Contraintes de qualité (nature des matériaux, états de surface, précision des mesures, ..)

Aléas externes: relatif à l’environnement :

- Contraintes climatiques (température, pression, humidité..)
- Contraintes mécaniques (chargement, déformations imposées...)

Étude qualitative des scénarios de défaillance

La défaillance d’une structure peut avoir son origine dans des phénomènes complètement différents : rupture, corrosion, etc... chacun de ces phénomènes conduisant à la défaillance est appelé mode de défaillance. Un enchaînement d’évènements, conduisant à la défaillance, forme un scénario de défaillance.

En mécanique on rencontre plusieurs types de défaillances, qui apparaissent suite à un choc, une surcharge, à une fatigue mécanique ou thermique, à un fluage, à l’érosion ou la corrosion mais le plus souvent,

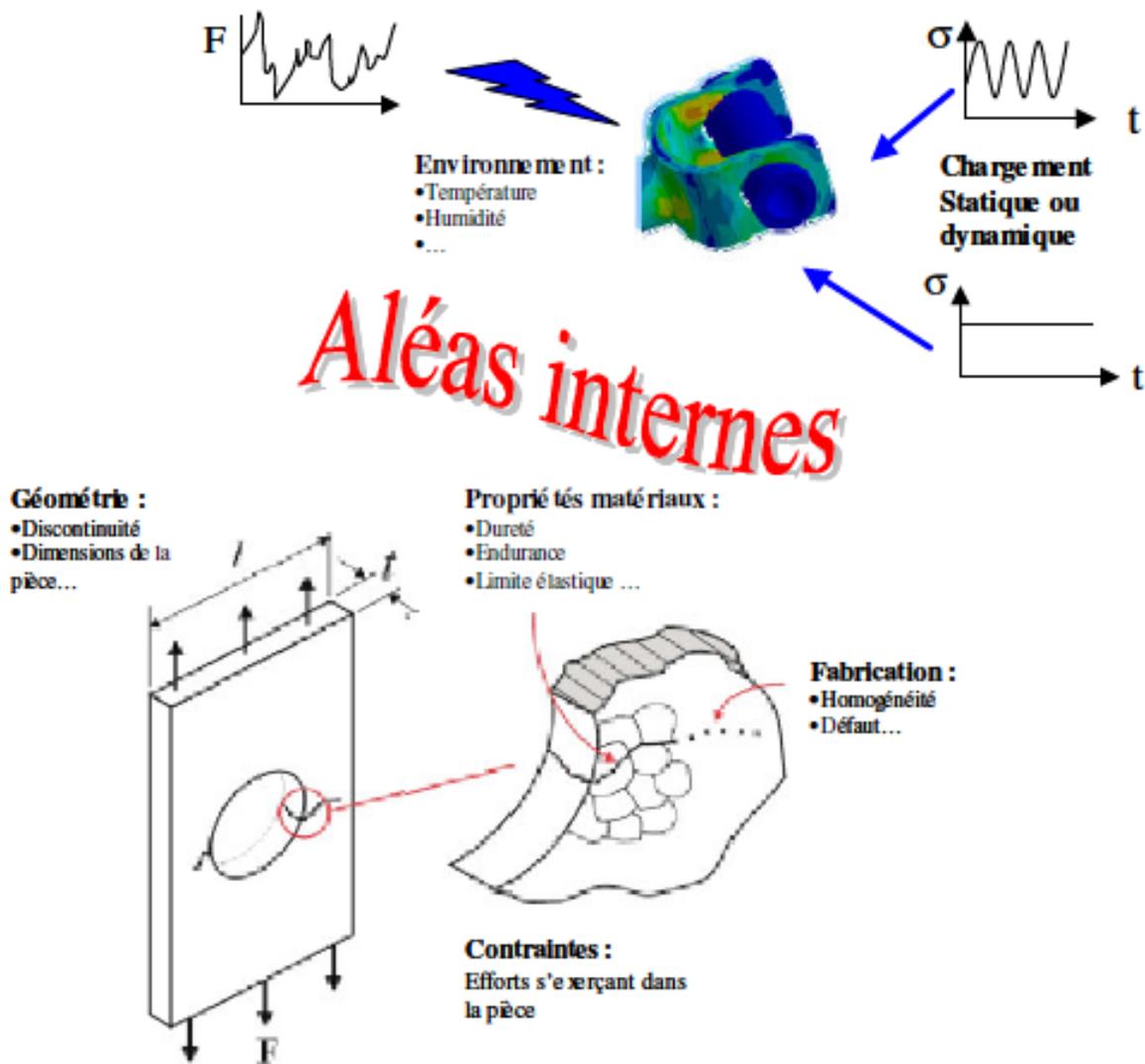


Figure 7.2: Aléas internes et externes d'une structure mécanique

on constate la défaillance par la rupture d'une pièce. Des méthodes d'analyse prévisionnelle de la sûreté de fonctionnement peuvent aider à définir les modes de défaillance et leurs causes pour la structure étudiée, par exemple.

L'Analyse Préliminaire des Risques (APR) et L'Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC)

Cette étape d'étude qualitative, des scénarios de défaillance, doit être réalisée en présence des différents experts du domaine.

7.10.2 Analyse mécanique

Choix et formulation du modèle mécanique

A chaque mode de défaillance initié est associé un modèle mécanique traduisant la réponse de la structure vis à vis d'un scénario de défaillance (fatigue, Mécanique de la rupture, ...), en fonction des variables de

conception de base (chargements, géométrie, caractéristiques matériaux, ...). Il s'agit d'un modèle de sollicitations.

Les modèles mécaniques font intervenir des lois de comportement sous sollicitations statiques ou dynamiques, avec éventuellement une évolution de la structure par endommagement et rupture.

Dans le cas où nous ne disposons pas de formules analytiques exactes et simples pour construire ce modèle, plusieurs solutions sont envisageables. Ces solutions peuvent être très lourdes à mettre en oeuvre :

- Directement par calculs éléments finis, afin d'obtenir la réponse de la structure pour un ensemble de données fixé;
- Technique des plans d'expérience...
- Définition d'un critère de résistance limite

Le critère de résistance limite (état limite ou critère de défaillance) fixe le seuil au-delà duquel on décidera qu'il y a défaillance (limite élastique du matériau, ténacité du matériau,..). C'est un choix arbitraire, il se décide entre les concepteurs et les experts. Il s'agit du modèle de résistance.

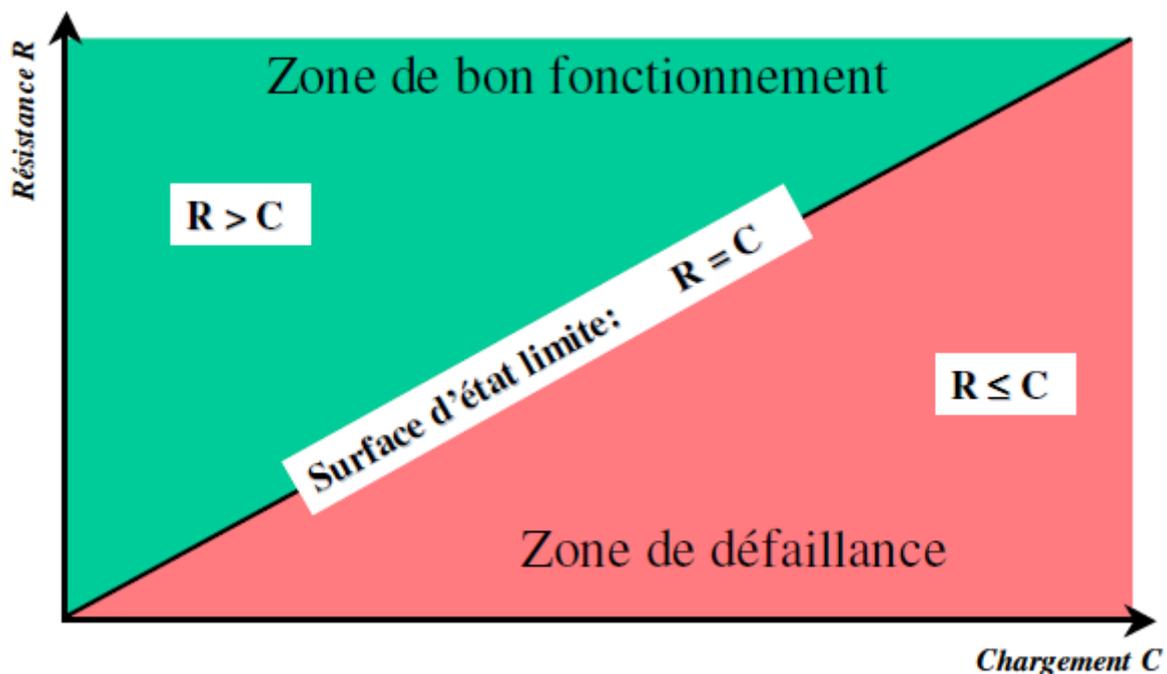


Figure 7.3: Cas élémentaire de Fonction d'état d'une structure.

L'état de la structure est qualifié défaillant s'il vérifie un des critères de résistance limite par rapport au mode de défaillance considéré, sinon il est dit de bon fonctionnement. Les états défaillants ou de bon fonctionnement forment deux domaines complémentaires : le domaine de défaillance (constitué de tous les états défaillants) et le domaine de bon fonctionnement (ou de sûreté). La frontière entre ces deux ensembles est appelée surface d'état limite.

7.11 Simulation Monte Carlo

Le principe de la simulation, au sens commun du terme, est d'utiliser un modèle, c'est-à-dire une représentation abstraite d'un système ou d'un problème, et d'étudier l'évolution de ce modèle sans faire fonctionner le système réel. C'est par exemple le cas lorsque vous allez à la banque pour un prêt : on vous dit combien vous payeriez chaque mois si vous acceptiez l'offre, sans pour autant avoir à le faire nécessairement. Modéliser consiste donc à poser un problème sur papier ou sur ordinateur afin de l'étudier. C'est aussi ce qui est fait pour les prévisions météorologiques, l'étude d'un phénomène physique, la construction et la mise au point de nouveaux avions, etc. Pour le cas d'un prêt bancaire, il s'agit de calculs relativement élémentaires, mais d'autres exemples nécessitent d'utiliser des méthodes particulières.

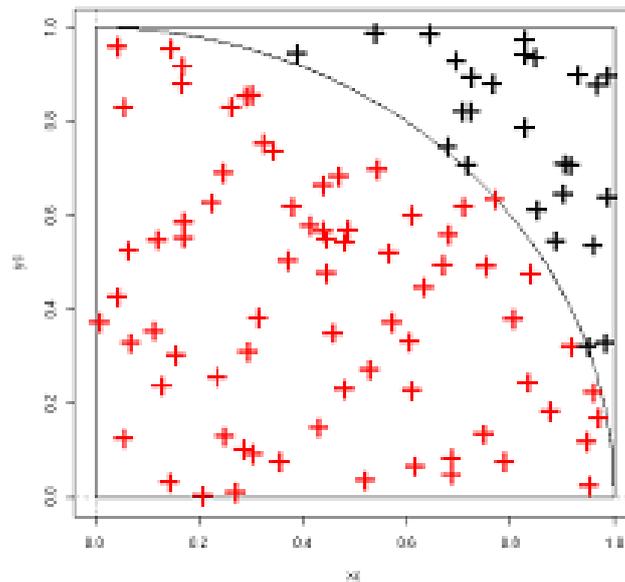


Figure 7.4: Exemple de la Méthode de Monté Carlo

La simulation de Monte-Carlo est une méthode d'estimation d'une quantité numérique qui utilise des nombres aléatoires. Stanisław Ulam et John von Neumann l'appelèrent ainsi, en référence aux jeux de hasard dans les casinos, au cours du projet Manhattan qui produisit la première bombe atomique pendant la Seconde Guerre mondiale. La simulation d'un prêt bancaire par exemple n'est pas une simulation de Monte-Carlo car il s'agit de calculs exacts à partir du nombre de mensualités et du taux d'intérêt ; aucun phénomène aléatoire n'intervient dans les calculs.

La simulation de Monte-Carlo présente le double avantage d'être simple d'utilisation et de pouvoir être appliquée à un très large éventail de problèmes. Elle est utilisée en finance, pour déterminer quand lever une option sur un bien financier ; en assurance, pour évaluer le montant d'une prime ; en biologie, pour étudier les dynamiques intra et intercellulaires ; en physique nucléaire, pour connaître la probabilité qu'une particule traverse un écran ; en télécommunications, pour déterminer la qualité de service ; ou de façon générale pour déterminer la fiabilité d'un système, sa disponibilité ou son temps moyen d'atteinte de la défaillance.

La méthode de simulation directe de Monte-Carlo ([Ayyub and Mccuen, 1997], [Villemeur, 1988]) présente l'avantage de pouvoir évaluer la fiabilité quelle que soit la forme des lois statistiques des variables

de conception. L'inconvénient majeur est que les probabilités de défaillance à vérifier étant très faibles, il est nécessaire d'effectuer de nombreux tirages engendrant des temps de calcul très importants ([Ayyub and Mccuen, 1997]).

Pour réduire le temps de simulation et corriger les résultats obtenus par les méthodes approximatives de FORM/SORM, des méthodes de réduction de variance sont proposées. L'idée est de ne plus faire de simulation autour des valeurs moyennes des variables aléatoires mais autour du point de défaillance le plus probable trouvé soit avec la méthode FORM ou soit avec SORM. Le nombre de simulation est beaucoup plus faible qu'avec une application directe de la méthode de Monte-Carlo.

La principale méthode de réduction de variance est la méthode d'échantillonnage préférentiel (ou importance sampling en anglais). Cette méthode de simulation est applicable à tout problème, elle donne une meilleure précision et un nombre de simulation beaucoup moins important que la méthode directe de Monte-Carlo. Néanmoins, le coût de calculs peut être trop important et inacceptable en pratique.

Titre : Évaluation de la fiabilité des systèmes mécatroniques en phase de développement

Mots clés : Mécatronique, fiabilité, interactions multi-domaines, réseaux de Pétri, réseaux Bayésiens dynamiques, incertitudes épistémiques, fonctions de croyances.

Résumé : L'étude de la fiabilité des systèmes mécatroniques est un axe de recherche relativement récent. Ces études doivent être menées au plus tôt au cours de la phase de conception, afin de prévoir, modéliser et concevoir des systèmes fiables, disponibles et sûrs et de réduire les coûts et le nombre de prototypes nécessaires à la validation d'un système. Après avoir défini les systèmes mécatroniques et les notions de sûreté de fonctionnement et de fiabilité, nous présentons un aperçu des approches existantes (quantitatives et qualitatives) pour la modélisation et l'évaluation de la fiabilité, et nous mettons en évidence les points d'amélioration et les pistes à développer par la suite. Les principales difficultés dans les études de fiabilité des systèmes mécatroniques sont la combinaison multi-domaines (mécanique, électronique,

informatique) et les différents aspects fonctionnels et dysfonctionnels (hybride, dynamique, reconfigurable et interactif). Il devient nécessaire d'utiliser de nouvelles approches pour l'estimation de la fiabilité. Nous proposons une méthodologie d'évaluation de la fiabilité prévisionnelle en phase de conception d'un système mécatronique, en prenant en compte les interactions multi-domaines entre les composants, à l'aide de la modélisation par Réseaux de Pétri, Réseaux bayésiens et fonctions de croyance. L'évaluation de la fiabilité en phase de développement doit être robuste, avec une confiance suffisante et prendre en compte tant les incertitudes épistémiques concernant les variables aléatoires d'entrée du modèle utilisé que l'incertitude sur le modèle pris en hypothèse. L'approche proposée a été appliquée à l'«actionneur intelligent» de la société Pack'Aero.

Title : Evaluating reliability of mechatronics systems in development phase

Keywords: Mechatronics, reliability, modeling, multi-domain interactions, Petri Nets, Dynamic Bayesian Networks, epistemic uncertainties, Belief Networks.

Abstract: Reliability analysis of mechatronic systems is one of the most dynamic fields of research. This analysis must be conducted during the design phase, in order to model and to design safe and reliable systems. After presenting some concepts of mechatronic systems and of dependability and reliability, we present an overview of existing approaches (quantitatives and qualitatives) for the reliability assessment and we highlight the perspectives to develop. The criticality of mechatronic systems is due, on one hand, to multi domain combination (mechanical, electronic, software), and, on the other hand, to their different functional and dysfunctional aspects (hybrid, dynamic, reconfigurable and interactive).

Therefore, new approaches for dependability assessment should be developed. We propose a methodology for reliability assessment in the design phase of a mechatronic system, by taking into account multi-domain interactions and by using modeling tools such as Petri Nets and Dynamic Bayesian Networks. Our approach also takes into account epistemic uncertainties (uncertainties of model and of parameters) by using an evidential network adapted to our model. Our methodology was applied to the reliability assessment of an "intelligent actuator" from Pack'Aero.