HAL
open science

Contribution à la maintenance proactive par la formalisation du processus de pronostic des performances de systèmes industriels

Pierre Cocheteux

To cite this version:

Pierre Cocheteux. Contribution à la maintenance proactive par la formalisation du processus de pronostic des performances de systèmes industriels. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2010. Français. NNT : . tel-01746384v3

HAL Id: tel-01746384

https://theses.hal.science/tel-01746384v3

Submitted on 15 Dec 2010

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

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

Nancy-Université

FACULTE DES SCIENCES & TECHNOLOGIES

U.F.R. Faculté des Sciences et Technologies

École Doctorale IAEM Lorraine

Département de Formation Doctorale Automatique

Thèse

Présentée pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy I

en Automatique, Traitement du Signal et des Images, Génie Informatique

par **Pierre COCHETEUX**

CONTRIBUTION A LA MAINTENANCE PROACTIVE PAR LA FORMALISATION DU PROCESSUS DE PRONOSTIC DES PERFORMANCES DE SYSTEMES INDUSTRIELS

Soutenue publiquement le 15 novembre 2010 devant la commission d'examen :

Membres du jury :

Président :	M. Nidhal REZG	Professeur à l'Université Paul Verlaine de Metz
Rapporteurs :	M. Mustapha OULADSINE	Professeur à l'Université Paul Cézanne, Aix-Marseille III
	M. François PERES	Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
Examinateurs :	M. Dimitris KIRITSIS	Maître d'Enseignement et de Recherche à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse)
	Mme Liliane PINTELON	Professeur à la Katholieke Universiteit Leuven (Belgique)
	M. Alexandre VOISIN	Maître de conférences à Université Henri Poincaré, Nancy I
	M. Benoît IUNG	Professeur à l'Université Henri Poincaré, Nancy I (Directeur de thèse)
	M. Eric LEVRAT	Maître de conférences à l'Université Henri Poincaré, Nancy I (Co-Directeur de thèse)

Centre de Recherche en Automatique de Nancy

Faculté des Sciences et Technologies - Bât. Premier cycle, BP 70239

54506 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex

Nancy-Université

FACULTE DES SCIENCES & TECHNOLOGIES

U.F.R. Faculté des Sciences et Technologies

École Doctorale IAEM Lorraine

Département de Formation Doctorale Automatique

Thèse

Présentée pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy I

en Automatique, Traitement du Signal et des Images, Génie Informatique

par **Pierre COCHETEUX**

CONTRIBUTION A LA MAINTENANCE PROACTIVE PAR LA FORMALISATION DU PROCESSUS DE PRONOSTIC DES PERFORMANCES DE SYSTEMES INDUSTRIELS

Soutenue publiquement le 15 novembre 2010 devant la commission d'examen :

Membres du jury :

Président :	M. Nidhal REZG	Professeur à l'Université Paul Verlaine de Metz
Rapporteurs :	M. Mustapha OULADSINE	Professeur à l'Université Paul Cézanne, Aix-Marseille III
	M. François PERES	Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
Examinateurs :	M. Dimitris KIRITSIS	Maître d'Enseignement et de Recherche à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Suisse)
	Mme Liliane PINTELON	Professeur à la Katholieke Universiteit Leuven (Belgique)
	M. Alexandre VOISIN	Maître de conférences à Université Henri Poincaré, Nancy I
	M. Benoît IUNG	Professeur à l'Université Henri Poincaré, Nancy I (Directeur de thèse)
	M. Eric LEVRAT	Maître de conférences à l'Université Henri Poincaré, Nancy I (Co-Directeur de thèse)

Centre de Recherche en Automatique de Nancy

Faculté des Sciences et Technologies - Bât. Premier cycle, BP 70239

54506 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex

À mon père,

À ma famille et à mes amis,

À Gabriela.

Remerciements

Je tiens à remercier les personnes qui m'ont suivi au quotidien et qui ont fait de ces années des moments que je n'oublierai pas : tout d'abord Benoît Iung, professeur au CRAN, pour ses conseils et ses remarques qui ont permis à ce travail d'avancer et d'aboutir dans les meilleures conditions. Je souhaite également dire un grand merci à Eric Levrat, maître de conférences au CRAN, pour le temps qu'il m'a accordé, les discussions scientifiques qui m'ont poussées et ont fait avancer cette thèse pour arriver à ce résultat, mais également de toute l'amitié qu'il m'a fait preuve et de toutes les discussions moins professionnelles mais toutes aussi importantes à mes yeux. Enfin je voudrais exprimer mes sincères remerciements à Alexandre Voisin, maître de conférences au CRAN, dont j'ai pu apprécier de nombreuses qualités tant professionnelles qu'humaines au cours et en dehors des travaux menés ensemble.

Je remercie vivement M. François Pérès, Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes, et M. Mustapha Ouladsine, Professeur à l'Université Paul Cézanne, Aix-Marseille III, d'avoir accepté d'être rapporteurs de ce travail. Je tiens à remercier également Mme Liliane Pintelon, Professeur à l'Université Catholique de Louvain ainsi que M. Dimitris Kiritsis, Maître d'Enseignement et de Recherche à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne qui ont accepté d'examiner les travaux présentés dans ce mémoire. Je remercie tout particulièrement M. Nidhal Rezg, Professeur à l'Université Paul Verlaine de Metz, pour avoir accepté de présider ce Jury.

Je souhaite également remercier l'ensemble des personnes avec qui j'ai pu mener des enseignements : William, Alexis et surtout David, mon tuteur de monitorat, pour tous ses conseils et dont le travail a grandement facilité la création et la réalisation des activités pédagogiques faites ensemble.

Un grand merci spécial à Domi (et la p'tite famille) pour cette première année réussie et les rendez-vous nancéo-strasbourgo-vosgiens, Nico pour tous ces moments pour gérer ensemble la BSR mais également et surtout pour toutes ces discussions partagées, Aurélie (et Sébastien), Edouard, Max et Thomas pour avoir cohabité avec moi au sein d'un même bureau, Idriss et Maha pour m'avoir fait découvrir leur pays, Cristian pour sa gentillesse et pour "la segunda", Mario, Romain et Pascale pour leur amitié indéfectible. Bien sûr je n'oublie pas l'ensemble des personnes que j'ai côtoyé à la BSR, anciens et nouveaux doctorants du 5ème et 6ème : les deux Salah, Zied, Rémy, Esma, Leila, Belynda, Hind, Sylvain, Jérémy, Dragos, Simona, Vicky, Carlos et Isabel, Andres, Ahmed, Ramy, Jean-Philippe…

Ces remerciements ne seraient pas complets s'il n'y avait pas quelques lignes pour ma famille qui m'a suivi tout au long de ces onze années d'étude : à ma mère pour son affection et son soutien inconditionnel, Hélène, Cécile et Gaëtan pour leur présence et leur compréhension, à mon grand-père et les nordistes pour leurs encouragements, mais également à ma nouvelle famille latino pour leur amitié.

Je ne peux terminer ces remerciements sans quelques mots pour celle qui représente la découverte la plus importante de mes années de thèse. Pour ses encouragements, son aide aussi bien matérielle que psychologique et scientifique, sa présence et son affection, Gabriela a toujours su me pousser même dans des moments difficiles. Peu de mots peuvent traduire ma reconnaissance pour ce qu'elle a fait, alors je n'en n'utiliserai qu'un seul : *merci…*

Sommaire

Remerciements 5
Sommaire 7
Liste des figures 13
Introduction générale 19
Chapitre 1 : Vers un soutien logistique intégré support d'une maintenance prévisionnelle 27
I. Introduction 29
II. Une vision globale du système 29
II.1. Vers une performance globale… 29
II.2. … et sa maîtrise sur le cycle de vie 30
II.3. Un nouveau point de vue sur la fonction maintenance 31
II.3.1. La fonction maintenance : une fonction au cœur du système de soutien 31
II.3.2. De la causalité dysfonctionnelle à une vision système de la maintenance 32
II.4. Une maintenance intégrée au sein du cycle de vie : vers le *Life cycle Maintenance* 33
II.4.1. Phase des conceptions 35
II.4.2. Réalisation du système de fabrication 37
II.4.3. Exploitation de la maintenance 37
II.4.4. Fin de vie de la maintenance 38
III. Le soutien logistique intégré comme ingénierie de maintenance 39
III.1. Ingénierie des exigences du soutien logistique intégré 39
III.2. Les stratégies de maintenance 41
III.2.1. Définition des stratégies de maintenance 42
III.2.2. Les stratégies et les décisions associées 44
III.2.3. Vers de nouvelles stratégies de maintenance 46
III.3. Sélection des stratégies de maintenance 49
III.3.1. Sélection de la stratégie globale 49
III.3.2. Sélection des stratégies locales 50
III.3.3. Conclusion sur les stratégies de maintenance et leur sélection 51
IV. La maintenance prévisionnelle 51
IV.1. Les processus communs aux différentes stratégies de maintenance 52
IV.1.1. Au niveau stratégique 52
IV.1.2. Au niveau tactique 53
IV.1.3. Au niveau opérationnel 53

IV.2. Les processus spécifiques de la maintenance prévisionnelle 53
IV.3. Les systèmes supports à la maintenance prévisionnelle 55
V. Conclusion 59
Chapitre 2 : Modélisation générique du pronostic système 61
I. Introduction 63
II. Communauté du pronostic et état de l'art des travaux 63
II.1. Les définitions du pronostic 63
II.2. Evolution historique de la communauté pronostic 65
II.2.1. Au niveau des structures 65
II.2.2. Au niveau des objectifs de recherche 68
II.3. Etat de l'art et classifications des approches du pronostic 68
II.3.1. Les classifications existantes 68
II.3.2. Limites des classifications existantes et proposition 72
II.3.3. Synthèse sur l'état de l'art 75
II.3.4. Conclusion : mise en évidence des objectifs de la thèse 77
III. Formalisation générique du processus « Pronostiquer » 77
III.1. La démarche de formalisation choisie 77
III.2. L'environnement du processus « Pronostiquer » 78
III.2.1. La finalité de « Pronostiquer » 80
III.2.2. Les informations nécessaires au processus « Pronostiquer » 82
III.3. Décomposition de « Pronostiquer » en sous-processus 84
III.3.1. Piloter le pronostic 85
III.3.2. Initialiser l'état et les performances 87
III.3.3. Projeter dans le futur 87
III.3.4. Calculer les durées de vie résiduelles 88
III.4. Synthèse 88
IV. Conclusion 90
Chapitre 3 : Formalisation du pronostic système : proposition et ingénierie d'architectures 93
I. Introduction 95
II. Les fondements du pronostic système 95
II.1. Modélisation des systèmes 95
II.1.1. Définition de la performance d'un système 95
II.1.2. Modélisation récursive des systèmes 97
II.1.3. Définition de la performance composant 98

II.2. Les indicateurs à pronostiquer 98
II.2.1. Les indicateurs de performance 98
II.2.2. Les indicateurs de dégradation 99
II.2.3. Les stratégies de projection des indicateurs 99
III. Le pronostic des indicateurs 102
III.1. Modèle de pronostic d'indicateurs de dégradation 102
III.2. Modèle d'agrégation des performances de niveau composant 102
III.3. Méthode de construction du modèle d'agrégation des dégradations sur les performances 105
III.3.1. Les relations causales 106
III.3.2. Analyses dysfonctionnelles : AMDEC et HAZOP 107
III.3.3. Particularisation des relations causales 108
III.3.4. Mise en œuvre des relations causales par un système d'inférences floues supporté par le modèle ANFIS 116
III.3.5. Estimation des paramètres du modèle ANFIS : détermination des fonctions de fuzzification et défuzzification 119
IV. Les architectures de pronostic système 122
IV.1. L'architecture cumulée 122
IV.1.1. Modèle des performances de niveau système 122
IV.1.2. Synthèse de l'architecture cumulée 123
IV.2. L'architecture étagée 125
IV.2.1. Présentation de l'architecture 125
IV.2.2. Synthèse sur l'architecture étagée 126
IV.3. Conclusion sur les architectures : vers une architecture mixte 127
V. Méthodologie pour l'ingénierie du pronostic système 128
V.1. Analyses des comportements nominaux 130
V.2. Analyses dysfonctionnelles 131
V.3. Hiérarchisation et sélection des modes de dégradation/défaillance et des déviations 132
V.4. Sélection des indicateurs 132
V.5. Construction de l'architecture 132
V.6. Sélection des modèles de projection 133
V.7. Vérification des performances du pronostic système 133
VI. Conclusion 133
Chapitre 4 : Application à la plateforme TELMA 137
I. Introduction 139

II. Présentation de la plateforme TELMA 139
II.1. Description du système de presse/poinçonnage 140
II.1.1. La partie opérative du processus de presse/poinçonnage 140
II.1.2. La partie commande du processus 141
II.2. Description du système de simulation des dégradations/défaillances 142
II.3. Description du système de surveillance 143
III. Description du cas d'application 144
III.1. Analyse fonctionnelle 144
III.2. Analyses dysfonctionnelles 147
III.3. Mise en œuvre de la méthodologie de sélection des indicateurs et des modèles associés : définition de l'architecture 151
III.3.1. Sélection des modèles de projection liés au sous-système d'avance 152
III.3.2. Sélection des modèles de projection liés au sous-système de pressage 155
IV. Construction du modèle de pronostic et résultats 156
IV.1. Construction des modèles de projection 157
IV.1.1. Projection du couple tambour 157
IV.1.2. Projection de la quantité de bande avancée 158
IV.1.3. Fonction de calcul des performances du sous-système de pressage 159
IV.2. Résultats 165
V. Discussion 167
VI. Conclusion 169
Conclusion générale 171
Publications de l'auteur 177
Bibliographie 181
Annexes 195

Liste des figures

Figure 1. Définition de la performance globale durable (Reynaud, 2003) 30
Figure 2. Cycle de vie d'un système (AFIS, 2009) 31
Figure 3. Le système et son système de soutien (AFIS, 2009) 32
Figure 4. Représentation du concept de causalité dysfonctionnelle 33
Figure 5. Représentation en parallèle des cycles de vie des systèmes principal et de fabrication et de leurs maintenances 35
Figure 6. Analyse intégrée du Système de Soutien Logistique (AFIS, 2009) 36
Figure 7. Comet Circle™ (marque déposée de Ricoh, Co, Ltd) 38
Figure 8. Chaîne des exigences à travers les phases de conceptualisation et conception (AFIS, 2009) 39
Figure 9. Cycles d'ingénieries dans le cadre du SLI 40
Figure 10. Les différentes stratégies de maintenance 42
Figure 11. Les éléments relatifs au développement d'une action de maintenance (Knezevic *et al.*, 1997) 44
Figure 12. Positionnement relatif des stratégies de maintenance 48
Figure 13. Positionnement relatif des stratégies de maintenance vis-à-vis de leurs coûts de modélisation 50
Figure 14. Les processus de la maintenance (Francastel, 1999) 52
Figure 15. Processus spécifiques de la maintenance prévisionnelle au sein des processus globaux de la maintenance 54
Figure 16. Couches de l'architecture OSA-CBM 56
Figure 17. Structure du WatchDog™ 56
Figure 18. Structure du PEDS de type « toaster » (Byington *et al.*, 2002) 57
Figure 19. Architecture du SIMP (Muller, 2005) 58
Figure 20. Evolution des travaux concernant le pronostic au sein du CRAN et de la communauté 67
Figure 21. Représentation hiérarchique des approches de pronostic (Byington *et al.*, 2002; Muller, 2005) 69
Figure 22. Correspondance entre les classifications de (Byington *et al.*, 2002; Heng *et al.*, 2009; Jardine *et al.*, 2006) 70
Figure 23. Classification de (Vasile, 2008) 71
Figure 24. Classification des métriques de performance de pronostic (Saxena *et al.*, 2008) 72
Figure 25. Classification des travaux relatifs au pronostic 74
Figure 26. Correspondance entre les activités supportées par les différents processus des systèmes de maintenance prévisionnelle 79
Figure 27. Environnement de « pronostiquer » 80
Figure 28. Décomposition du processus « Pronostiquer » 85
Figure 29. Modèle de seuil 86
Figure 30. Seuils composants et système 88
Figure 31. Performances d'un processus (AFIS, 2009) 96
Figure 32. Modélisation générique d'un processus 96
Figure 33. Décomposition récursive du processus d'accumulation 97
Figure 34. Décomposition récursive du processus d'accumulation 99
Figure 35a. Instanciation de la décomposition générique sur les pronostics d'indicateurs de dégradation 102
Figure 36. Représentation de la causalité dysfonctionnelle au niveau composant 104
Figure 37. Exemple du système poulie-courroie 104

Figure 38. Méthodologie de construction du modèle d'agrégation 106
Figure 39. Exemple simple de composant..... 109
Figure 40. Structure de l'ANFIS..... 116
Figure 41. Structure de l'ANFIS donnée par les relations..... 119
Figure 42. Fuzzification de la propriété du flux entrant..... 120
Figure 43. Fuzzification de l'indicateur de dégradation 120
Figure 44. Fuzzification de l'indicateur de défaillance 121
Figure 45. Défuzzification de la propriété du flux sortant 121
Figure 46. ANFIS paramétré permettant d'agréger dégradations et déviations 122
Figure 47. Modèles des performances d'un système à deux composants 123
Figure 48. Architecture étagée à trois niveaux 125
Figure 49. Structuration des pronostics de performance en sous-processus..... 126
Figure 50. Structure du modèle injectant les indicateurs de niveaux inférieurs dans le modèle de projection 127
Figure 51. Exemple d'architecture mixte 128
Figure 52. Méthodologie proposée de sélection des indicateurs et de leur modèle de projection associé 130
Figure 53. La plateforme TELMA (vue réelle et schématique)..... 140
Figure 54. Les quatre sous-systèmes de la partie opérative du processus de presse/poinçonnage .. 141
Figure 55. Décomposition fonctionnelle de TELMA..... 141
Figure 56. Architecture de commande de la plateforme TELMA..... 142
Figure 57a. Module de génération de défaillance de la partie commande 143
Figure 58. Analyse fonctionnelle de niveau système 144
Figure 59. Analyse fonctionnelle de niveau sous-système 144
Figure 60. Architecture organique du système de presse/avance..... 145
Figure 61. Décomposition de la fonction « Avancer la bande » (niveau composant) 146
Figure 62. Décomposition de la fonction « Presser la bande » (niveau composant)..... 147
Figure 63. Données brutes pour le poste d'avance..... 152
Figure 64. Architecture mixte de la fonction « Presser la bande pas à pas » 153
Figure 65. Visualisation des indicateurs « couple mis en forme » (rouge), de l'age réel « temps depuis deb dégradation » (bleu) et de la cadence (noir)..... 154
Figure 66. Visualisation des indicateurs de quantité de bande avancée (rouge) et de la cadence (noir) 155
Figure 67.Modèle de projection de TELMA..... 156
Figure 68. Importation des données dans Matlab depuis BayesiaLab et KASEM 157
Figure 69. Projection du couple tambour en Nm (point et rouge) et données initiales (passé proche : croix et bleu) (le temps est donné en dizaine de seconde)..... 158
Figure 70a. Structure du réseau de neurones..... 158
Figure 71. Projection de la quantité de bande avancée (vert) avec les couples tambour réel (rouge) et projeté (bleu) (le temps est donné en dizaine de secondes) 159
Figure 72. Règles pour l'ANFIS calculant la propriété Ccoupre et la structure associée..... 161
Figure 73. Règles pour l'ANFIS calculant la propriété Efflin et la structure associée..... 162
Figure 74. Règles pour l'ANFIS calculant la propriété Qdeforme et la structure associée 163
Figure 75. Fonction de fuzzification du couple tambour 165
Figure 76. Résultat de la projection au pas 85 du défaut de forme des produits finis 166

Figure 77. Evolutions temporelles des probabilités de perdre le flux et d'être en défaillance 166
Figure 78. Obtention du RUL pour un seuil de 0,5 167
Figure 79. Structure du modèle de pronostic incluant un processus de vérification de cohérence. . 175

Introduction générale

Les systèmes industriels sont de plus en plus complexes et mettent en jeux de multiples technologies où cohabitent le matériel, le logiciel, les communications, etc. De plus les attentes et les contraintes du marché et de la société en termes économique, de sécurité, d'impact sur l'environnement… (Ducq *et al.*, 2003) vis-à-vis de ces systèmes imposent désormais de s'intéresser à leur performance globale et ceci tout au long de leur cycle de vie. Cette performance est d'autant plus difficile à maîtriser que l'évolution continue de l'environnement, les reconfigurations fréquentes du système, le vieillissement des composants… modifient sans cesse l'état du système (Muller, 2005). Ceci est d'autant plus vrai dans la phase de Maintien en Conditions Opérationnelles (MCO), considérée comme la plus « impactante » sur la performance globale, d'où l'importance de mettre en œuvre un système de soutien totalement adapté pour garantir les objectifs attendus sur le système principal.

Dans le système de soutien, l'un des leviers majeurs d'action sur la performance est la maintenance (Sénéchal, 2004). Par conséquent, tenir compte de cette dynamique du changement à la fois au sein du système principal mais aussi du système de soutien implique d'évoluer vers des pratiques de maintenance plus proactives. En effet, la prise en compte de la dynamique d'évolution des caractéristiques du système principal requiert au minimum de surveiller le système et son environnement afin de réagir en cas d'apparition de dégradations du processus opérant ou de dérives de la qualité du produit ou du service, voire d'anticiper ces aléas pour éviter d'en subir les conséquences. De telles considérations sont la base de la maintenance prévisionnelle.

La mise en œuvre d'une stratégie de maintenance prévisionnelle s'appuie nécessairement sur le développement d'un processus de pronostic dont la capacité de proactivité fait de lui le processus clé de la maintenance prévisionnelle (Wang et Vachtsenavos, 1999). Le pronostic a pour objectif d'estimer l'évolution des dégradations futures des différents composants du système et l'évolution future de la performance du système (Voisin *et al.*, 2010). Ces objectifs sont réalisés à partir de la connaissance sur le système (structure, composition, technologie…) et d'informations passées (historique des modes de fonctionnement passés), présentes (état courant), et futures (scénario de production et de maintenance). Il est couplé avec un processus d'aide à la décision de maintenance prévisionnelle permettant d'évaluer de façon dynamique différents scénarii de maintenance applicables pour ramener le système dans ses performances nominales et de les hiérarchiser suivant le contexte (Muller, 2005 ; Thomas, 2009).

Cependant, le pronostic est, à cause de sa relative jeunesse, le processus le moins avancé en termes de formalisation et d'intégration (Wang et Vachtsenavos, 1999). Formaliser le processus de pronostic est ainsi un défi scientifique majeur pour la diffusion industrielle de ce type de stratégie comme mis en évidence par (Lee *et al.*, 2006):

"In spite of the progress made, many fundamental issues still remain:

- *Most of the developed prognostics approaches are application or equipment specific. A generic and scalable prognostic methodology or toolbox does not exist.*
- *Currently, methods are generally focused on solving the failure prediction problem. Tools for system performance assessment and degradation prediction have not been well addressed"*

La première problématique mentionnée ci-dessus met en évidence un manque de généricité dû au fait que les méthodes de pronostic sont majoritairement centrées sur le développement d'un pronostic spécifique à une application, sans chercher à établir une modélisation du processus

(Jardine *et al.*, 2006). La deuxième problématique traite elle de la prise en compte des différents niveaux d'un système : point de vue global (vue « système »), point de vue des composants et point du vue « sous-système ou fonctionnel ». En effet beaucoup de travaux se focalisent sur le niveau composant (Saxena *et al.*, 2008) alors qu'ils devraient désormais considérer le système dans sa globalité (et non pas en prenant chaque composant de façon séparée).

Face à ce double constat, cette thèse a pour objet de contribuer à la formalisation du processus de pronostic, avec comme originalité l'apport d'une vision système se matérialisant par la proposition d'un pronostic système générique évaluant les dégradations futures des composants du système et ses performances futures. Cette contribution est structurée selon trois axes :

1. Un modèle générique formalisant la connaissance générale du pronostic indépendamment du niveau d'abstraction et des outils de pronostic (réponse à la première problématique de Lee). Le modèle générique résulte d'une modélisation informationnelle et fonctionnelle du pronostic, permettant de définir l'environnement et les flux traités par le pronostic (vue informationnelle), ainsi que ses sous-processus génériques nécessaires à sa réalisation (vue fonctionnelle) (Cocheteux *et al.*, 2007 ; Voisin *et al.*, 2010).

2. La définition du pronostic système supporté par deux architectures (cumulée et étagée) permettant de structurer un ensemble de modèles élémentaires construits à partir du modèle générique et permettant d'estimer l'ensemble des dégradations et performances futures (réponse à la deuxième problématique de Lee). Le « pronostic système », mot clé de ce travail, s'entend comme étant le processus devant évaluer l'évolution future (sous forme de RUL ou de trajectoire) d'un ensemble de niveaux (composant, sous-système et système), au travers d'indicateurs représentatifs de la dégradation (niveau composant) et des pertes de performances (niveaux composant, sous-système et système).

3. Une méthodologie d'ingénierie permettant la mise en œuvre du pronostic sur des systèmes spécifiques par le déploiement de ces architectures (réponse à la deuxième problématique de Lee). Cette méthodologie permet d'aborder un point essentiel de la phase d'ingénierie du pronostic : la détermination de l'ensemble des composants à considérer par celui-ci et le choix des modes de défaillance à pronostiquer.

L'ensemble de ces trois axes est présenté dans ce mémoire de thèse à travers le développement de quatre chapitres.

Le chapitre 1 permet d'introduire le contexte actuel de la maintenance des systèmes complexes et ses besoins d'évolution. Ainsi la maintenance est positionnée dans un contexte de performance globale et d'intégration à l'ensemble du cycle de vie du système principal. Cette intégration se réalise dès la phase d'ingénierie des systèmes principal et de soutien dans le cadre de la définition d'un soutien logistique intégré (approche Ingénierie Système). Ceci est abordé à travers une ingénierie des exigences interconnectant les conceptions des deux systèmes. Dans cette phase, un ensemble de stratégies de maintenance peut être choisi, et notamment la maintenance prévisionnelle qui possède une capacité de proactivité particulièrement adaptée à une maîtrise de la performance de façon globale. La maintenance prévisionnelle est présentée d'un point de vue fonctionnel, ainsi que les systèmes existant permettant de la mettre en œuvre, faisant émerger ainsi un processus central : le pronostic.

Sur la base de l'introduction au processus de pronostic développé au chapitre 1, le chapitre 2 a pour objet d'en détailler les fondements. Tout d'abord, un historique de l'évolution des travaux de la communauté scientifique est présenté tant au niveau des structures que des travaux de recherche menés. Les états de l'art déjà réalisés sont analysés et mettent en avant une vision principalement centrée sur l'outil de pronostic à un niveau composant. Afin d'apporter une vision plus système sur l'ensemble des travaux, nous proposons une nouvelle classification permettant d'éclairer différemment l'état de l'art en mettant en avant les manques de généricité et de vision multi-niveaux d'abstraction.

Pour répondre au manque de généricité, une définition issue d'une synthèse des définitions existantes du pronostic et une formalisation informationnelle et fonctionnelle générique sont proposées. Cette formalisation est réalisée à l'aide d'une méthode de type « approche processus » permettant de définir l'environnement du pronostic et ses interactions avec celui-ci (formalisation des flux entrants et sortants du pronostic) de façon statique (sans considération des comportements dynamiques). Puis, une décomposition en sous-processus génériques a été détaillée permettant de formaliser l'ensemble des activités à mener pour aboutir à un résultat de pronostic.

En réponse au besoin de vision d'abstraction multi-niveaux, le concept de pronostic système est défini comme étant le processus évaluant les évolutions des performances liées à chaque niveau d'abstraction et des dégradations de composants en s'appuyant sur un ensemble de modèles de pronostic élémentaires. Toutefois avant la mise en œuvre du pronostic système, au minimum deux verrous scientifiques nécessitent d'être levés :

- la formalisation des relations entre l'ensemble des évolutions futures des indicateurs de niveaux composant, sous-système ou système au sein d'une même architecture de pronostic de systèmes multi-composants par l'établissement de relations d'agrégation.
- l'ingénierie pour un pronostic système permettant de déterminer l'ensemble des indicateurs de niveaux composants, sous-systèmes ou système à pronostiquer.

Le chapitre 3 décrit et justifie les deux derniers points de notre apport et constitue une réponse aux deux verrous scientifiques mis en évidence dans le chapitre précédent. Tout d'abord nous présentons deux architectures de pronostic système : les architectures cumulée et étagée. Ces architectures ont pour objectif d'établir les liens entre les indicateurs de niveaux différents. Dans le cadre d'architecture cumulée ils sont agrégés à l'aide d'indicateurs de niveau composant pour obtenir les performances du système. Dans le cadre d'une architecture étagée, les pronostics sont réalisés de façon indépendante.

La seconde partie de ce chapitre présente une méthodologie de sélection des composants et de leurs modes de défaillance devant être considérés lors de l'ingénierie d'un pronostic système. Ces modes de défaillances cibles doivent permettre d'obtenir l'ensemble des performances du système à pronostiquer. Cette sélection s'appuie sur une extension des méthodes AMDEC et HAZOP nommée AD^3P (Analyse des dégradations, défaillances et déviations pour le pronostic) proposée dans ces travaux. Enfin le choix du modèle/outil de pronostic doit être mené en fonction de la connaissance disponible sur les mécanismes élémentaires de dégradation pour obtenir un pronostic adapté et suffisamment performant vis-à-vis des critères de précision et de justesse désirés.

Les contributions formalisées au chapitre précédent sont appliquées sur un cas concret (proche de l'industrie) dans le chapitre 4 permettant d'illustrer la valeur ajoutée et de montrer l'applicabilité des deux architectures proposées dans le chapitre précédent. Ce cas applicatif est extrait de la plateforme d'expérimentation TELMA, située au sein de l'AIPL (Atelier Inter-établissements de Productique Lorrain). De même, c'est sur ce cas d'application que sera montrée la faisabilité de notre méthode d'ingénierie avec au final une discussion sur les résultats obtenus.

Enfin une partie réservée à la conclusion et aux perspectives de ce travail s'ajoute à ces chapitres en fin de mémoire.

Chapitre 1 : Vers un soutien logistique intégré support d'une maintenance prévisionnelle

I. Introduction

Le contexte actuel d'accroissement de la concurrence au sein du monde industriel a conduit ce dernier à modifier sa vision de la performance pour tendre désormais vers une vision globale sur l'ensemble du cycle de vie des systèmes. C'est donc naturellement qu'il a vu ses organisations, ses méthodes et ses objectifs évoluer en intégrant cette problématique. Cette évolution a été rendue possible par l'augmentation de la quantité d'informations disponible, leur qualité et leur accessibilité.

La maîtrise de la performance globale ne peut se faire qu'en ayant une vision totale de la performance, c'est-à-dire en ayant une vision intégrant le système principal et ses systèmes contributeurs et en considérant cette vision tout au long du cycle de vie (et non pas uniquement en phase d'exploitation). Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de s'appuyer sur de nouvelles méthodes et pratiques telles que celles préconisées par l'Ingénierie Système afin de contrôler toute perte de performance potentielle par une maîtrise plus anticipative (plus proactive) que corrective. Pour cela, de nouvelles ingénieries doivent être mises en œuvre qui couplent les ingénieries des systèmes principal et de soutien et qui envisagent l'ensemble des environnements et parties prenantes rencontrées par les systèmes au cours de leur vie.

Dans ce cadre, le système contributeur de soutien et son processus pivot de maintenance, qui a pour objectif de maintenir en conditions opérationnelles le système principal au cours du temps, sont des leviers essentiels sur la performance globale (Sénéchal, 2004). Ces leviers, face au besoin d'anticiper des pertes, doivent pouvoir également évoluer vers des stratégies plus proactives telles que la maintenance prévisionnelle.

En ce sens, ce chapitre a pour but de présenter les évolutions de l'ingénierie du système de maintenance par son intégration à l'ingénierie du système principal et de développer les raisons qui poussent les industriels à s'orienter vers de nouvelles stratégies de maintenance. Une focalisation sur la plus récente et la plus prometteuse, la maintenance prévisionnelle, est réalisée avec une description de ses processus mettant en évidence son processus clé qui est le processus de pronostic.

II. Une vision globale du système

II.1. Vers une performance globale…

Les performances des systèmes industriels ne sont plus perçues désormais de manière instantanée ou sur une phase particulière de leur vie, mais à travers une vision sur l'ensemble du cycle de vie du système (Rebitzer *et al.*, 2004). Cette approche globale demande d'intégrer un ensemble de points de vue de la performance et de prendre en compte le contexte dans lequel se situe le système et l'influence de l'ensemble des parties prenantes en lien avec le système au cours des différentes phases de sa vie. Afin de mettre en avant ces différents points de vue, la performance globale est projetée sur trois axes complémentaires (Reynaud, 2003) : économie, social et environnement (figure 1). Des méthodes existantes proposent déjà d'évaluer les performances suivant les axes environnement, e.g. (Zhang *et al*., 2006), et économie, e.g. (Brindle, 2005), ce dernier se basant sur des critères comme le Life Cycle Cost[1] (LCC). Ces travaux font également suite à l'émergence du

[1] Coût sur l'ensemble de la vie du système

paradigme d'eco-efficience (DeSimone and Popoff 1997) qui promeut l'évolution vers une utilisation, des produits et équipements, plus longue et plus réfléchie. L'objectif est de diminuer l'impact environnemental de ceux-ci sur l'ensemble de leur cycle de vie et d'augmenter leur durée d'utilisation, afin de rationnaliser la consommation de nouveaux produits, équipements ou parties d'équipement (pièce de rechange).

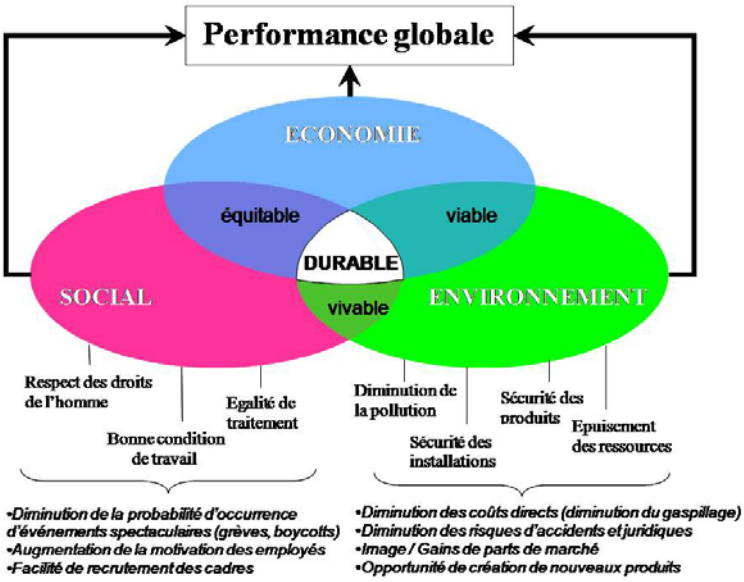


Figure 1. Définition de la performance globale durable (Reynaud, 2003)

II.2. … et sa maîtrise sur le cycle de vie

Ces performances doivent pouvoir être maîtrisées sur l'ensemble de la vie du système afin de les conserver dans un espace de fonctionnement tolérable vis-à-vis des performances attendues. Cela nécessite de mettre en œuvre des processus de décision afin de corriger les éventuelles dérives, en se basant sur un ensemble d'indicateurs couvrant de façon globale la performance. Or actuellement, l'ensemble des performances des systèmes se déclinent selon un ensemble d'aspects (coûts, disponibilité, qualité…) qui sont appréhendés de façon séparée par les parties du système concernées (systèmes de production, de maintenance…) sans réelle considération d'une vision intégrative vis-à-vis de l'impact sur les performances globales. Toutefois des initiatives issues du monde industriel, auxquelles s'est associé le monde académique comme celles portées par l'INCOSE[2] ou l'AFIS[3], proposent des méthodologies, des méthodes et des outils mettant en place une Ingénierie Système (IS) dont l'objectif est la maîtrise de cette performance sur l'ensemble de la vie.

Le cycle de vie système représente l'ensemble des phases chronologiques suivies par un système tout au long de son existence. Il est constitué de cinq phases principales (figure 2) :

- Analyses des besoins et conceptualisation : caractérisation de la finalité du système à faire et des contraintes qu'il doit respecter,
- Conception : cette phase définit, à partir de la finalité et des objectifs attendus, le système à faire ainsi que l'ensemble des systèmes contributeurs,

[2] International Council on Systems Engineering (www.incose.org)

[3] Association Française d'Ingénierie Système (www.afis.fr)

- Réalisation et intégration du système dans son environnement,
- Exploitation et maintien en condition opérationnel (MCO) : le système remplit ses missions,
- Retrait de service : le système est recyclé.

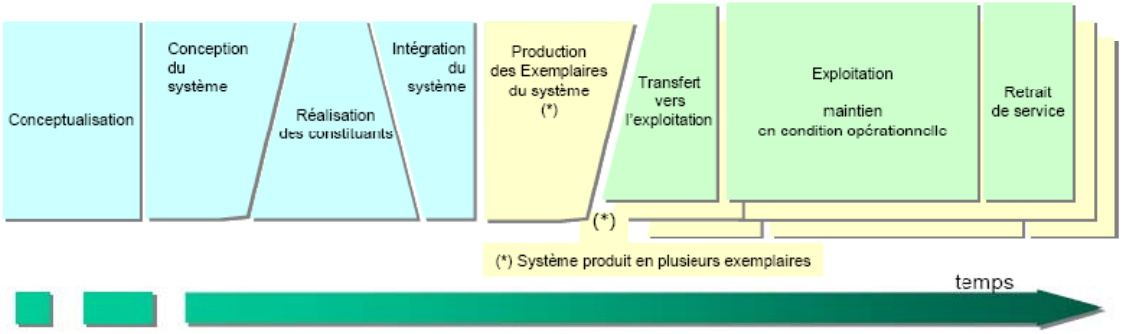


Figure 2. Cycle de vie d'un système (AFIS, 2009)

Pour maîtriser la performance globale, il y a donc besoin d'une quantité de connaissances et d'informations importante à la fois représentative de chacune des phases mais aussi des contenus à échanger entre chacune des phases. Cette représentation volumineuse et ces échanges ont été rendus possibles par l'émergence des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC). Ils ont en revanche contribué à l'augmentation de la complexité des systèmes car induisant de nouvelles performances à atteindre et demandant la mise en œuvre de sous-systèmes supplémentaires pour supporter ces nouvelles fonctionnalités, ce qui rend le besoin de démarches structurées de conception comme celles fournies par l'IS d'autant plus important.

II.3. Un nouveau point de vue sur la fonction maintenance

Ces nouvelles contraintes (prise en compte du cycle de vie, augmentation de la complexité) impliquent (a) une reconsidération nécessaire des ingénieries des différents éléments du système afin de les intégrer dans une ingénierie plus globale permettant de prendre en compte l'ensemble des services attendus et des contraintes (Meier *et al.*, 2010) et (b) des évolutions de certaines pratiques pour exploiter au mieux ces informations disponibles. Ces évolutions sont aussi à envisager pour la maintenance afin de la considérer comme un réel système contributeur au système principal. Le paragraphe suivant a pour objectif de positionner la maintenance pour en obtenir un panorama clair vis-à-vis de ses objectifs attendus et de son contexte dans une vision IS.

II.3.1. La fonction maintenance : une fonction au cœur du système de soutien

Au sens de l'IS, le système principal réalise le produit ou le service finalité de l'entreprise pour satisfaire les attentes du client (AFIS, 2009). Le produit peut être un service ou matériel, e.g. gestion des comptes d'une banque pour le domaine bancaire, système de transmission de signaux pour le domaine des télécommunications, flotte de camions pour le domaine des transports, système de production pour le domaine de la production industrielle… Le système de soutien est le système contributeur qui assure le maintien en conditions opérationnelles (MCO) du système principal (figure 3), c'est-à-dire qu'il garantit le bon fonctionnement courant du système et garantit son adaptation aux évolutions nécessaires. L'AFIS le définit comme l'ensemble des moyens et procédures nécessaires pour qu'un système reste, au long de sa durée d'utilisation, apte à l'emploi qui lui est assigné.

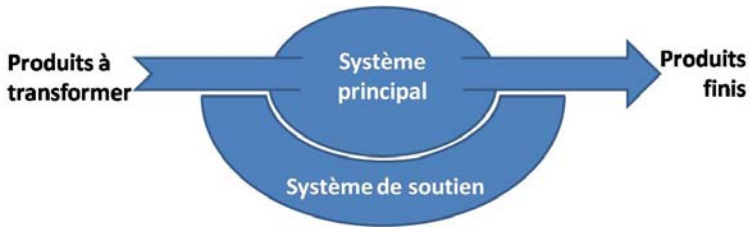


Figure 3. Le système et son système de soutien (AFIS, 2009)

Dans cette vision intégrée système principal/système de soutien, le processus de maintenance, prend toute son importance comme levier principal d'action sur les trois axes de la performance globale. D'un point de vue social, un matériel bien maintenu est un matériel qui comporte potentiellement moins de risques accidentels et de meilleures conditions de travail pour les personnels qui l'utilisent. D'un point de vue environnemental, c'est un matériel qui pollue moins et qui possède une durée de vie plus longue. Enfin d'un point de vue économique, un matériel bien maintenu engendre des coûts supplémentaires de maintenance normalement compensés par de meilleurs niveaux de disponibilité de l'équipement, diminution des coûts d'approvisionnement en pièce de rechange ou amélioration du rendement énergétique, tout en permettant de diminuer le risque d'accident (affectant le personnel ou l'environnement) et ainsi les coûts indirects (image de l'entreprise, confiance du client, pénalité de retard ou taxes et contributions financières dues à des équipements polluants). Par conséquent, des indicateurs clé de performance[4] de la maintenance peuvent être définis, couvrant les trois axes, comme par exemple ceux proposés par (Parida et Kumar, 2006) : e.g. indicateurs relatifs aux coûts pour l'axe économique, sécurité et environnement sur les axes social et environnemental, ou des indicateurs de satisfaction du personnel sur l'axe social.

II.3.2. De la causalité dysfonctionnelle à une vision système de la maintenance

L'ensemble des ces indicateurs de performance relie la fonction maintenance avec l'objectif de conserver le système dans un état de bon fonctionnement. Un état de bon fonctionnement est défini par rapport aux Finalité-Missions-Performances du système. Un système fonctionne normalement lorsqu'il réalise ce pourquoi il existe, ce qui signifie qu'un état de bon fonctionnement est un état dans lequel le système réalise sa finalité. Cette finalité est transcrite sous formes d'exigences attendues pouvant être de natures différentes (relatives à la qualité du produit, aux coûts, à la sûreté de fonctionnement…) permettant de satisfaire l'ensemble des missions que doit réaliser le système. Enfin le niveau de performances demandées pour chaque exigence permet de définir la limite entre un état de bon fonctionnement et un autre.

Ainsi l'objectif de la maintenance doit être de conserver les niveaux des performances du système principal dans des zones compatibles avec la réalisation des missions. Avec le temps et l'utilisation, les performances diminuent. Ces pertes de performance sont le résultat du concept de causalité dysfonctionnelle qui exprime le fait que la dégradation et/ou défaillance des composants affecte les performances du système.

La figure 4 présente l'ensemble des éléments en lien avec la perte de performance système : l'ensemble des composants et leurs dégradations/défaillances impactent les performances système

[4] De l'anglais Key Performance Indicator (KPI)

(représentation de la causalité dysfonctionnelle par une flèche liant la dégradation des composants et les performances du système). Ces éléments évoluent dans un environnement qui influence également les dégradations/défaillances et les performances. Il peut, selon les technologies utilisées, modifier l'évolution de la dégradation ou défaillance des composants et impacte donc, *via* la causalité dysfonctionnelle, sur les performances du système. Cet environnement est caractérisé par des facteurs influents de deux types :

- Variables opérationnelles : elles proviennent du contexte opérationnel et représentent les sollicitations de l'utilisateur du système (e.g. cadence ou type de production, durée d'utilisation, température d'un four…). Ces facteurs sont des variables maîtrisables[5].
- Variables environnementales : elles proviennent de l'environnement du système (e.g. conditions atmosphériques : température, pression extérieure…). Ces facteurs sont subis et donc non- maîtrisables.

Enfin la maintenance qui a pour objectif de mettre en œuvre des actions afin d'éviter que les performances soient en deça des limites admissibles, utilise les performances comme informations d'entrée pour construire sa décision. Les moyens d'action de la maintenance sont des actions réalisées sur les composants : en agissant sur les causes (dégradations ou défaillances), la maintenance rétablit les performances. **La maintenance fait donc l'objet d'un paradoxe d'échelle : agir au niveau des dégradations des composants afin d'obtenir des résultats au niveau des performances système**.

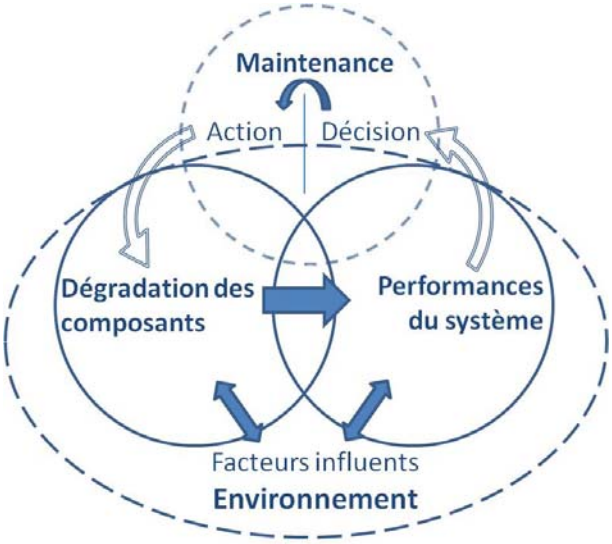


Figure 4. Représentation du concept de causalité dysfonctionnelle

II.4. Une maintenance intégrée au sein du cycle de vie : vers le *Life cycle Maintenance*

Le regain d'attention porté à la maintenance a permis tout d'abord de faire évoluer les mentalités, pour la faire passer de mal nécessaire associé à des objectifs cherchant à limiter l'impact économique de la maintenance sur les performances financières de l'entreprise, à un des leviers stratégiques de l'entreprise permettant d'envisager de nouveaux bénéfices. Pour cela, de nouvelles pratiques dans

[5] Dont l'utilisateur peut imposer la valeur

l'ingénierie de la maintenance ont été proposées à partir de considérations différentes des rapports entre la maintenance et son environnement. Les principales méthodes sont selon (Waeyenbergh et Pintelon, 2002) :

- la maintenance basée sur la fiabilité (Reliability Centred Maintenance - RCM),
- la maintenance basée sur le business (Business Centred Maintenance - BCM),
- la maintenance productive totale (Total Productive Maintenance - TPM)
- les « approches LCC » avec notamment le soutien logistique intégré[6] (SLI).

La RCM (Nowlan et Heap, 1978 ; Moubray, 1997) aborde principalement l'aspect fiabilité des composants d'un système en cherchant à maîtriser celle des composants les plus critiques alors que la BCM (Kelly, 1997) propose une démarche basée sur la déclinaison des objectifs d'entreprise sur la maintenance et cherche donc à améliorer le profit réalisé par la maintenance. Ces deux approches sont limitées vis-à-vis de la vision globale de la performance et considèrent la maintenance comme un élément indépendant du système. La TPM (Wireman, 2004) permet de lier l'utilisation du système principal et sa maintenance mais ne permet pas d'envisager ses problématiques sur l'ensemble de la vie du système et reste focalisé sur les équipements de production. En revanche, des approches comme le SLI (Soutien Logistique Intégré) permettent de ne plus considérer uniquement la maintenance durant la phase d'exploitation du système mais à la considérer au sein de l'ensemble des phases du cycle de vie (conception, fabrication, recyclage…) (Erbe *et al.*, 2007 ; Van Houten *et al.*, 1998).

Le SLI est une méthode de conception issue des normes militaires américaines (norme MIL STD 1388 (MIL STD, 1993)) à laquelle l'ensemble des partenaires du ministère de la défense américain devait se conformer en matière de support logistique. Elle a été ensuite reprise et étendue par d'autres travaux comme (Kumar *et al.* 2000 ; Jones, 2006) et a fait l'objet de la norme NF EN 60300-3-12 (AFNOR, 2004) qui donne comme objectif au SLI:

a) d'intégrer le concept de soutien logistique au sein même de la conception du produit (système à faire);

b) d'élaborer les dispositions de soutien logistique qui sont adéquatement liées à la conception et conjuguées les unes aux autres;

c) de fournir au client le soutien logistique approprié dès le début et tout au long de l'exploitation du produit, jusqu'à la mise au rebut, et ce à un coût optimal;

d) de permettre l'amélioration du soutien d'un produit tout au long de sa vie.

Le SLI permet donc d'intégrer les deux objectifs de la vision globale en ayant une vue intégrative du soutien avec le système principal et une vue cycle de vie en considérant la vie entière du système. Dans cette orientation, les auteurs de (Takata *et al.*, 2004) ont proposé d'associer à chaque phase du cycle de vie système des objectifs spécifiques à la maintenance introduisant ainsi le concept de « Life cycle Maintenance ».

[6] Méthode de gestion suivant laquelle tous les services de soutien logistique exigés par un client peuvent être rassemblés de façon structurée et coordonnée avec le produit (norme NF EN 60300-3-12 (AFNOR, 2004))

Le « Life cycle Maintenance » met en avant le propre cycle de vie de la maintenance et détaille les relations entre les vies du système principal et de celle du système de maintenance. À chaque phase, la maintenance a donc ses propres objectifs à remplir, qui ciblent des actions qui peuvent être réalisées sur le système lui-même (représentant le système principal de la figure 3) ou sur son système de fabrication (système manufacturier par exemple). Dans cette vue, le système de fabrication est un système et peut donc également être considéré en tant que système principal (SP) possédant son propre système de fabrication (récursivité du principe : système principal – système de fabrication – système de maintenance). Par exemple un système manufacturier est un système de fabrication (pour le produit manufacturé) et est également un SP qui possède ses propres systèmes contributeurs (et donc un système de fabrication et un système de maintenance).

Afin d'illustrer les différentes phases suivies par le système et son système de fabrication, la figure 5 représente les cycles de vie du SP, du système de fabrication ainsi que de leurs systèmes de maintenance respectifs. Les différentes phases du cycle de vie de chacun de ces systèmes évoluent en parallèle avec des synchronisations et des interactions (représentées sous forme de boucle de retour) à des moments précis.

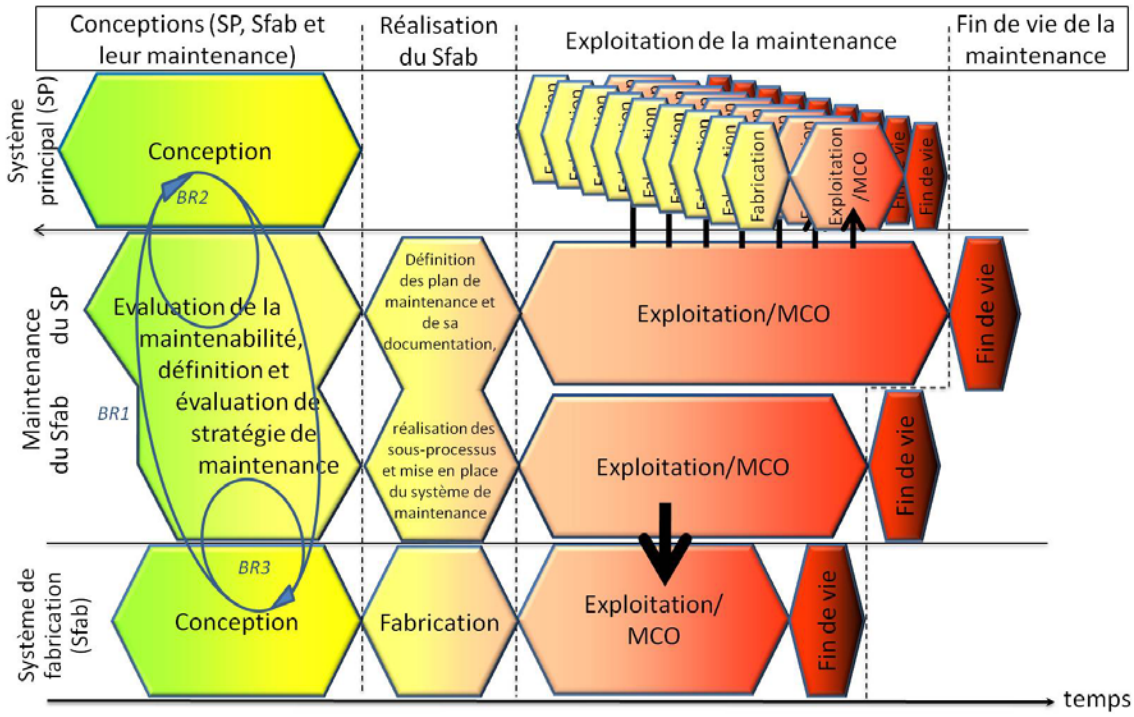


Figure 5. Représentation en parallèle des cycles de vie des systèmes principal et de fabrication et de leurs maintenances

II.4.1. Phase des conceptions

C'est sans doute la phase la plus critique car d'elle dépend toutes les phases suivantes. C'est pourquoi les trois conceptions (SP, systèmes de fabrication et maintenance (à travers la définition des stratégies de maintenance)) doivent être réalisées de façon conjointe. Les modifications apportées au cours de cette phase sont moins coûteuses que les reconceptions réalisées dans les phases suivantes. De plus, les nouveaux outils logiciels (simulation des procédés de fabrication, de gestion de flux et de production,…) reliés au sein d'une chaîne numérique permettent de mieux prendre en compte les évolutions futures du produit et les environnements dans lesquels il évoluera

au cours des différentes phases de vie. Cela permet d'intégrer les différentes contraintes qui en sont issues dès la conception.

Ainsi après une définition des besoins traduits en exigences initiales sur le SP et d'une première solution à réaliser, la phase de conception du système de fabrication peut être débutée en parallèle. Les étapes de validation entre conception du produit et conception du système de production peuvent amener à revoir la définition du produit pour intégrer les contraintes issues du système de production (boucle de retour *BR1*).

De même, les problématiques de maintenance dès la phase de conception doivent être prises en compte. Le besoin de voir le système principal répondre à sa finalité dans le temps fait de la disponibilité l'une des performances globales à garantir dont le niveau est défini par des exigences de sûreté de fonctionnement. La disponibilité étant issue des aspects fiabilité et maintenabilité, la définition du SP doit donc considérer ces points afin de faciliter les opérations de maintenance et/ou de limiter l'apparition de défaillance. Pour cibler les points critiques, des outils d'analyses dysfonctionnelles comme AMDEC[7], HAZOP[8], APR[9], Arbre de défaillance… (Léger, 2009) doivent être utilisés. Ensuite des travaux d'évaluation de stratégies de maintenance peuvent permettre de valider les exigences de sûreté de fonctionnement avant l'existence physique du SP (Zille, 2009). Une non-validation peut entraîner une modification de la solution proposée du SP à travers la boucle de retour *BR2*.

Enfin la phase de conception du système de fabrication doit prendre en compte les mêmes contraintes de conception dues à la maintenance que celles sur le SP. Analyse dysfonctionnelle, intégration des exigences de sûreté de fonctionnement dans la conception et validation a priori de ces exigences doivent être des étapes, éventuellement répétées de façon itérative à travers la boucle de retour *BR3*, du processus de conception. Ces relations sont représentées pour les aspects maintenance entre l'analyse du soutien logistique[10] et l'ingénierie du système principal (figure 6).

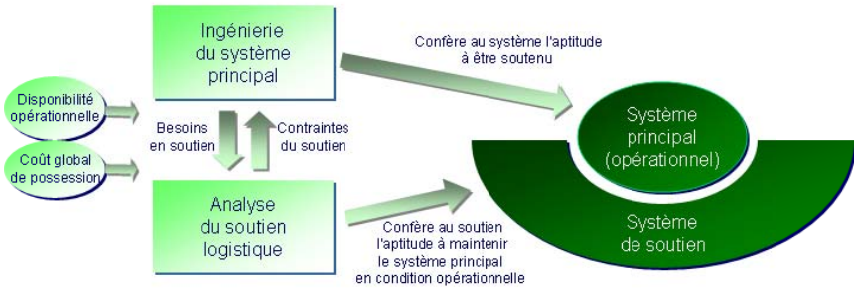


Figure 6. Analyse intégrée du Système de Soutien Logistique (AFIS, 2009)

[7] Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité

[8] Hazard and operability

[9] Analyse préliminaire de risques

[10] Application sélective d'une variété de tâches, entreprises en vue de contribuer à la satisfaction des critères d'aptitude au soutien et des autres objectifs du soutien logistique intégré (norme NF EN 60300-3-12 (AFNOR, 2004))

II.4.2. Réalisation du système de fabrication

Dès lors que les conceptions sont terminées, la phase de fabrication du système de fabrication est déclenchée. La maintenance doit être opérationnelle à la fin de cette phase. Les plans de maintenance du produit et du système de fabrication supportant les stratégies choisies ainsi que la définition et l'allocation des moyens nécessaires à la réalisation de la fonction « maintenir » doivent être définis. Ceci comprend, par exemple, les activités de conception/fabrication d'outils spécifiques physiques (e.g. matériel de dépose spécifique, outillage particulier…) ou logiciels (e.g . paramétrage de la surveillance, d'outil d'aide à la décision, création des outils de pronostic et diagnostic…), la mise en place d'un service/équipe de maintenance adaptée (e.g. recrutement de personnel, activité d'acquisition de compétence du personnel…), mise en place des supports aux activités de management de la maintenance, création de protocoles spécifiques aux futurs systèmes à maintenir et de leurs documentations associées…

II.4.3. Exploitation de la maintenance

Cette phase est la phase d'exploitation des maintenances. Le rôle de la maintenance s'insère dans le MCO du système de fabrication et des différents SPs. Plus précisément, elles doivent assurer le MCO :

- des SPs lors de leurs phases d'exploitation par la minimisation des périodes de non respect des performances attendues (disponibilité, qualité du produit…), mais également par l'amélioration et le suivi des modifications des SPs,
- du système de fabrication en phase d'exploitation de façon semblable au précédent. Ce rôle de maintenir le système de fabrication est également le rôle joué par la maintenance lors de la phase de fabrication des SPs (Levrat *et al.*, 2008).

Ces deux processus (maintenance du SP et du système de fabrication) sont donc supportés par des ressources différentes (service et matériels différents). Ainsi lorsque le MCO du système de fabrication n'existe plus, seul le MCO des SPs est encore en activité.

La phase d'exploitation de la maintenance correspond à l'exploitation des maintenances mais également à une phase de MCO de celles-ci car :

- la maintenance, comme tout autre processus, doit avoir un objectif d'amélioration continue en intégrant notamment les retours d'expérience réalisés au cours de l'utilisation des systèmes maintenus. Les définitions issues des phases précédentes étant réalisées sur des connaissances *a priori*, des ajustements peuvent être réalisés avec la connaissance *a posteriori*.

- les systèmes maintenus pouvant évoluer, le processus de maintenance doit suivre ces évolutions.

Enfin chaque phase d'exploitation (du système de fabrication ou des SPs) se termine par la phase de retrait. Les opérations de recyclage peuvent être de différentes natures et sont synthétisées sur la figure 7 du Comet Circle™ (Takata *et al.*, 2004) : recyclage de façon totale ou partielle (composant) ou reconditionnement pour s'adapter à de nouveaux systèmes. Ainsi des opérations de démontage, de tri (des composants, des fluides (huile…)), de reconditionnement peuvent être supportées

partiellement par les processus de maintenance. La déconstruction terminale est effectuée par un système de retrait qui met en œuvre des procédures notamment afin de respecter une législation spécifique ou pour permettre de recycler des matières dans une logique de protection de l'environnement (Godichaud, 2009).

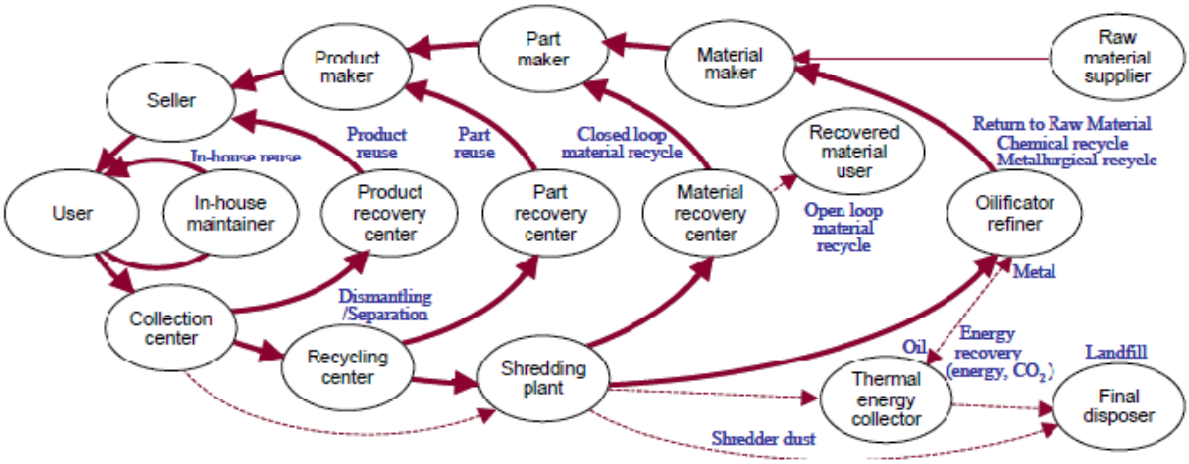


Figure 7. Comet Circle™ (marque déposée de Ricoh, Co, Ltd)

II.4.4. Fin de vie de la maintenance

Cette phase correspond à la clôture et éventuellement à la remise en forme des informations capitalisées, ainsi qu'au retrait des différentes ressources utilisées par les deux processus de maintenance tout au cours de leur vie. Les ressources matérielles spécifiques à la maintenance subissent ainsi une phase de retrait identique à celle représentée figure 7. Quant aux informations capitalisées, elles doivent être conservées et permettre d'affiner les stratégies de maintenance des autres systèmes de l'entreprise, que ce soit par de l'amélioration de stratégies existantes ou que ce soit par la prise en compte de cette expérience dans la stratégie d'un système en phase de conception.

La prise en compte du concept de « Life cycle Maintenance » contribue donc à faire émerger une vision globale du système en définissant ses missions au cours des phases de vie du système principal vis-à-vis de son propre cycle de vie. Le SLI semble une solution appropriée pour maîtriser la performance globale notamment du point de vue économique[11], tout en répondant aux besoins du client et du marché. Il doit donc permettre de supporter l'ingénierie de maintenance en l'intégrant dans une ingénierie globale par couplage avec l'ingénierie du SP.

[11] « *afin que le soutien puisse être effectué de la façon la plus efficace économiquement* » (norme NF EN 60300-3-12 (AFNOR, 2004))

III. Le soutien logistique intégré comme ingénierie de maintenance

Le SLI doit désormais permettre de coupler les ingénieries du SP et de maintenance le plus tôt possible, c'est-à-dire dès les phases de développement des spécifications (Kramer et Tumer, 2009). Le système de fabrication étant lui-même un SP, son ingénierie doit également être couplée à son propre système de maintenance. Dans le contexte de l'IS, cette phase est supportée par une ingénierie des exigences (Loucopoulos et Karakostas, 1995). Ainsi les deux ingénieries des exigences doivent être couplées.

L'ingénierie des exigences doit tout d'abord caractériser la finalité du système à faire et les contraintes nécessaires à l'intégration de celui-ci dans son environnement. Ces points sont tout d'abord exprimés au sein d'un cahier des charges fonctionnel (CdCf) par le maître d'ouvrage du système souhaité sous forme d'exigences dites initiales. Le maître d'œuvre établit ensuite une spécification, qui explicite sa compréhension du CdCf et qui tient compte des contraintes des autres parties prenantes, en établissant l'ensemble des exigences système (figure 8-partie a).

Ensuite, dans la conception fonctionnelle, l'architecture du système décomposée en sous-systèmes et les exigences système sont dérivées ou raffinées aux niveaux inférieurs. Une étape de vérification/validation des exigences permet de s'assurer que l'ensemble des exigences de niveau sous-système respecte l'ensemble des exigences de niveau système. À ce niveau, de nouvelles exigences peuvent apparaître dues à des parties prenantes impliquées uniquement sur le sous-système considéré. Désormais on peut considérer ce sous-système comme un autre système et le décomposer de la même manière en définissant une architecture interne et en dérivant ses propres exigences puis en les vérifiant et validant. Ce cycle est réalisé jusqu'au niveau considéré élémentaire appelé niveau constituant (figure 8-partie b). La succession des exigences de niveaux divers forme ainsi une chaîne des exigences.

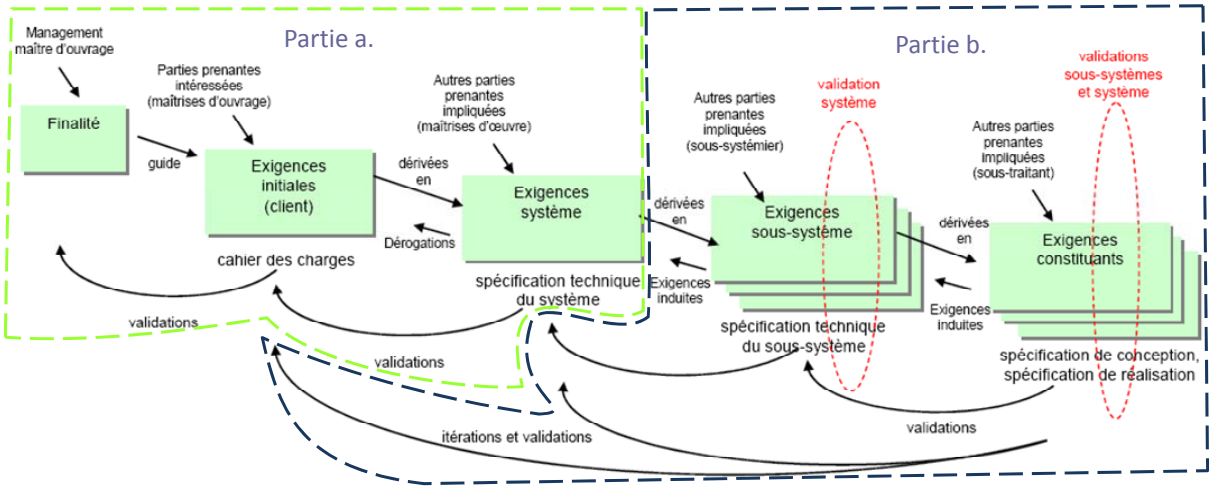


Figure 8. Chaîne des exigences à travers les phases de conceptualisation et conception (AFIS, 2009)

III.1. Ingénierie des exigences du soutien logistique intégré

Les ingénieries des exigences simultanées des SP et SM impliquent un couplage des chaînes des exigences. La figure 9 représente le déroulement de ces ingénieries des systèmes principal et de maintenance par la description des chaînes des exigences et de leurs interactions. Elles sont composées de phases de dérivation et de raffinement d'exigences (passage du SP au SM et/ou

passage à un niveau de bloc système inférieur). Chacune de ces phases se voit associer une phase de vérification/validation au sein de boucle de retour permettant de remettre en cause les propositions initiales. Les notions d'exigences initiales, système ou sous-système sont issues de la chaîne des exigences présentée figure 8.

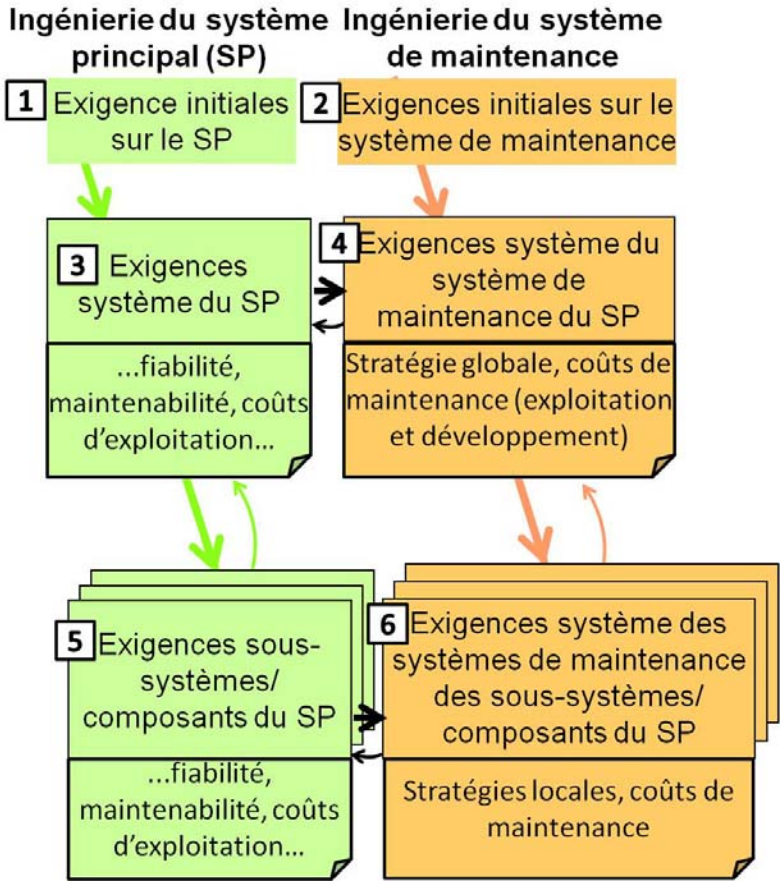


Figure 9. Cycles d'ingénieries dans le cadre du SLI

1 : exigences initiales du SP : exigences définissant les missions que le SP devra réaliser en termes fonctionnels (objectifs de la mission) ou non-fonctionnels (sûreté de fonctionnement, coûts d'exploitation…).

2 : exigences initiales du SM : elles caractérisent les propres contraintes du SM (e.g. impossibilité d'effectuer une opération de maintenance sur un avion en phase de vol).

3 : exigences système du SP : transcription par le maître d'œuvre des exigences initiales du SP complétées par ses propres exigences (e.g. coût de développement, technologies disponibles, contraintes de réalisation).

4 : exigences système du SM : elles sont formulées à partir d'exigences provenant de trois origines :

- les exigences système du SP qui établissent les performances attendues par les exploitants en termes de sûreté de fonctionnement du SP (fiabilité, disponibilité) et de coût d'exploitation en fonctionnement… Ces performances résultent d'une combinaison entre propriétés intrinsèques du SP (liées à sa propre conception) et propriétés du système de maintenance,

- les exigences initiales du SM qui induisent des contraintes sur celui-ci,
- les exigences propres au maitre d'œuvre du système de maintenance (e.g. organisation de la phase d'ingénierie de maintenance et coût de développement du SM).

Ces exigences aboutissent au choix de la **stratégie globale de maintenance**. Il s'agit de la stratégie choisie pour maintenir les performances du système et dont la sélection repose sur la nature du contexte global dans lequel évoluera le SP (voir partie III.3.1).

5 : exigences sous-système/composant[12] du SP : les exigences sous-système sont issues du processus de dérivation des exigences système du SP. Les sous-systèmes étant eux-mêmes décomposables en sous-systèmes et/ou composants, les exigences liées à ce niveau sont également dérivables, et ce jusqu'au niveau composant. Les deux catégories d'exigences sont dérivées : fonctionnelles et sûreté de fonctionnement. Ces dernières définissent les performances propres du sous-système/composant en termes de fiabilité, disponibilité, maintenabilité…

6 : exigences système des systèmes de maintenances des sous-systèmes/composants du SP. Ces exigences sont déduites :

- de la place du sous-système/composant au sein du système (impact sur la performance du système, criticité de la fonction supportée, coûts propres…) donnée par les exigences de sûreté de fonctionnement des sous-systèmes/composants du SP et les choix technologiques réalisés au niveau composant,
- des objectifs ou performances attendus du SM décrits par les exigences système du SM.

Elles aboutissent à la définition des **stratégies locales de maintenance**, c'est-à-dire les méthodes de management du sous-système ou composant considéré. Ces stratégies sont donc impactées par le choix de la stratégie globale et de l'influence du sous-système au sein de celle-ci (voir partie III.3.2).

Les étapes 4 et 6 sont les étapes primordiales de cette phase de formulation des exigences. En effet ce sont elles qui supportent les tâches de décision pour les stratégies de maintenance envisagées. Ces décisions ont des impacts forts car elles apportent des besoins spécifiques sur les processus de maintenance et peuvent impacter la conception du SP pour donner à ce dernier la capacité à être maintenu suivant la stratégie de maintenance choisie. Ce choix s'effectue parmi l'ensemble de stratégies de maintenance existantes. Ainsi, avant de pouvoir détailler ces opérations de décision au niveau global (4) et local (6) dans la partie III.3, il est nécessaire de présenter et définir les stratégies de maintenance.

III.2. Les stratégies de maintenance

Selon les normes FD X 60-000 (AFNOR, 2002) et NF EN 13306 (AFNOR, 2001), une stratégie de maintenance est une méthode de management utilisée en vue d'atteindre les objectifs de maintenance définis par la politique de maintenance. Elle permet donc de mettre en place les règles de décision utilisées lors du pilotage de la maintenance. Ce pilotage devra suivre ces règles tout en intégrant les contraintes et impacts des autres processus de l'entreprise (e.g. la production) ou des événements provenant de cas non envisagés ou non attendus. La décision de maintenance se décline de façon spécifique en fonction de la stratégie retenue.

[12] Le composant représente le niveau élémentaire (nommé constituant dans la Figure 8).

Il existe un certain nombre de stratégies classiques qui sont présentées dans la partie ci-dessous. Pour plus de détails, des revues bibliographiques sont disponibles dans (Cho et Parlar, 1991 ; Wang, 2002). Toutefois, comme nous l'avons indiqué précédemment, l'évolution du rôle de la maintenance doit également envisager de nouvelles pratiques de décision de maintenance faisant émerger de nouvelles stratégies de maintenance présentées ci-après (voir partie III.2.3).

III.2.1. Définition des stratégies de maintenance

On différencie traditionnellement deux classes de stratégies de maintenance en fonction de l'occurrence de la défaillance : la maintenance corrective et la maintenance préventive. L'ensemble des stratégies appartenant à ces deux classes est représenté sur la figure 10.

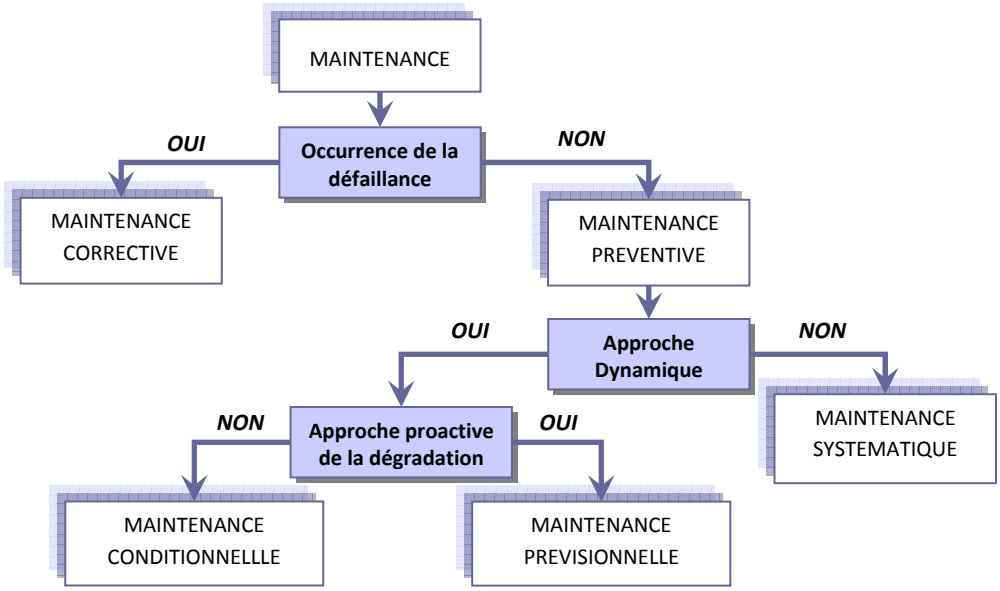


Figure 10. Les différentes stratégies de maintenance

Maintenance corrective : Maintenance exécutée après détection d'une panne[13] et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise (Norme NF EN 13306 (AFNOR, 2001)).

Elle est la stratégie possédant la règle de décision la plus simple : attendre le constat de la défaillance. Toutefois l'occurrence d'une défaillance présente des risques sur les trois axes de la performance globale :

- économique : perte de disponibilité pouvant impacter l'ensemble de l'entreprise, atteinte de la qualité du produit fabriqué, dégradation des composants environnant, création des retards de livraison…,
- social : situation accidentelle pour le personnelle d'exploitation et situation dangereuse pour le personnel de maintenance qui intervient sur un site dont l'état n'est pas maîtrisé,
- environnemental : situation accidentelle créant une pollution par exemple.

[13] État d'un bien inapte à accomplir une fonction requise, excluant l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autres actions programmées ou à un manque de ressources extérieures (Norme NF EN 13306 (AFNOR, 2001)).

Maintenance préventive : Maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien (Norme NF EN 13306 (AFNOR, 2001)).

Alors que l'occurrence d'une défaillance peut engendrer une perte de performance totale, la prévention permet d'éviter cette situation en maîtrisant le moment et l'état du système lors de l'intervention de maintenance préventive. Par rapport à la performance globale, les situations à risques sont mieux maîtrisées (axe social et environnemental), ainsi que les pertes économiques par le contrôle du calendrier de maintenance permettant de mieux gérer (en termes de gestion des stocks de pièces, gestion du personnel, gestion des actions de maintenance…).

Le cadre préventif permet de définir un intervalle de temps (entre le temps courant et l'occurrence de la défaillance) dans lequel doit être effectué l'action de maintenance. L'objectif de ces stratégies est d'énoncer des règles de décision permettant d'aider et de guider le décideur. Ainsi des évènements ont été définis dont les occurrences déclenchent les opérations de maintenance préventives. Ces événements sont obtenus par des indicateurs représentatifs de l'état de dégradation du matériel franchissant des seuils prédéterminés. Ces indicateurs peuvent représenter les conditions d'utilisation, la dégradation présente ou la dégradation future définissant ainsi trois stratégies : les maintenances systématique, conditionnelle et prévisionnelle.

Maintenance systématique : maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien (Norme NF EN 13306 (AFNOR, 2001)).

Elle utilise, comme indicateur, des informations provenant du contexte opérationnel (temps d'utilisation ou nombre de cycles) généralement fournies par les processus de management de l'utilisation (e.g. MES[14]). L'opération de maintenance est réalisée lorsque cet indicateur atteint une limite prédéfinie (seuil). L'étude des données et historiques des matériels équivalents permet ainsi de faire un lien entre occurrence de défaillance et conditions d'usage. Implicitement, l'hypothèse que les matériels se dégradent de la même façon, dans un environnement qui ne change pas, est réalisée. Afin de diminuer la probabilité de défaillance, le seuil utilisé est affecté d'un coefficient de sécurité pour prendre en compte un risque déterminé. Une telle stratégie de maintenance permet des règles de décision simples et facilement réalisables car elles demandent peu de connaissances sur le matériel courant. En revanche elle peut être totalement erronée en fonction des variabilités intrinsèque des matériels et de leurs environnements : soit parce que la dégradation évolue plus vite que prévu et la défaillance apparaît avant l'action de maintenance préventive, soit parce que la dégradation évolue moins vite (ou le coefficient de sécurité est trop important) et l'action de maintenance est effectuée sur un matériel pas ou peu dégradé alors qu'il est encore en état d'assurer sa fonction. Il est donc préférable d'ajuster la décision de maintenance sur l'état réel du système en mettant en place une surveillance des matériels (sous hypothèse qu'il est possible de la faire).

Maintenance conditionnelle : maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent (Norme NF EN 13306 (AFNOR, 2001)).

[14] Manufacturing Execution System

C'est une stratégie de maintenance qui propose des règles de décision subordonnées aux niveaux d'indicateurs. Ces indicateurs mesurés directement sur le système pendant son fonctionnement ou obtenus par traitement de mesures sont supposés représentatifs du niveau de dégradation. Cette stratégie s'appuie donc sur la dégradation du matériel et non sur sa défaillance. Elle permet de déclencher l'opération de maintenance lors du franchissement d'un seuil (qui représente le niveau de dégradation maximal tolérable) par un indicateur, c'est à dire lorsque l'état réel du matériel courant l'exige, permettant ainsi d'éviter une opération inutile et d'utiliser au mieux le matériel. Toutefois le déclenchement de l'opération de maintenance est subordonné à un événement dont la prédiction permettrait d'appréhender en amont son occurrence.

Maintenance prévisionnelle : maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien (Norme NF EN 13306 (AFNOR, 2001)).

Elle permet d'évaluer l'évolution future des indicateurs considérés comme représentatifs de l'état de santé du matériel et permet de déduire, par le franchissement d'un seuil, la date de la future défaillance ou l'intervalle de temps compris entre l'instant présent et cette date (appelé durée de vie résiduelle ou RUL de l'anglais Remaining Useful Life). Ces évaluations doivent donc prédire les évolutions futures des matériels en considérant l'ensemble des paramètres influents provenant des contextes opérationnel et environnemental futurs ainsi que des actions de maintenance futures.

III.2.2. Les stratégies et les décisions associées

Les stratégies de maintenance permettent de définir des règles de décision et de déterminer le contexte informationnel qui détermine un espace de décision de maintenance. Cet espace de décision est construit sur l'ensemble des réponses possibles aux questions données par (Knezevic *et al.*, 1997) (figure 11).

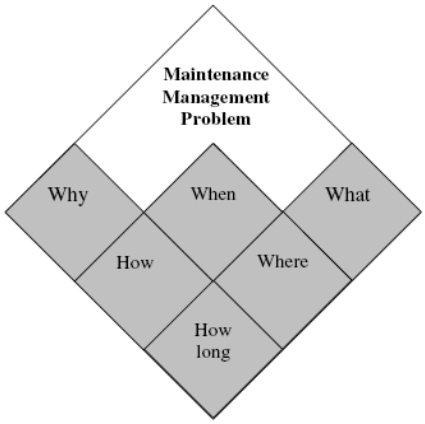


Figure 11. Les éléments relatifs au développement d'une action de maintenance (Knezevic *et al.*, 1997)

Tableau 1. Prise de décisions pour les stratégies de maintenance

	POURQUOI ?	QUAND ?	OÙ ?	QUOI ?
Maintenance corrective	Corriger une défaillance	Après le constat de la défaillance	Composant défaillant (résultat du diagnostic)	Dépannage ou Réparation
Maintenance préventive	Eviter une défaillance	Avant la défaillance qui est déterminée par le franchissement (présent ou futur) d'un seuil représentatif de la défaillance par un indicateur	Composant associé à un indicateur ou résultat d'un diagnostic	Défini par le plan de maintenance ou par l'expert
Maintenance systématique	Eviter une défaillance	Un indicateur d'usage atteint un seuil	Composant associé à l'indicateur d'usage	Défini par le plan de maintenance
Maintenance conditionnelle	Eviter une défaillance en optimisant le risque d'action superflue	Un indicateur surveillé atteint un seuil représentatif d'un niveau de dégradation	Composant associé à l'indicateur surveillé ou résultat d'un diagnostic	Défini par le plan de maintenance
Maintenance prévisionnelle	Eviter une défaillance en agissant au meilleur moment vis-à-vis de la dégradation et des performances du composant ou système	Un indicateur prédit de dégradation atteint un seuil	Composant associé à l'indicateur prédit ou résultat d'un diagnostic	Issue d'un processus d'aide à la décision rationalisant les performances du composant ou système

Ces questions permettent de mettre en évidence les caractéristiques à définir pour chaque action de maintenance :

- *WHY ? (POURQUOI ?)* : Quelle est la raison d'être d'une action de maintenance ?
- *WHEN ? (QUAND ?)* : Quand réaliser l'action de maintenance ?
- *WHAT ? (QUOI ?)* : Quelle est la nature de cette action de maintenance ?
- *WHERE ? (OÙ ?)* Où est localisé l'équipement objet de cette action de maintenance ?
- *HOW ? (COMMENT ?)* : Comment la réaliser ?
- *HOW LONG ? (COMBIEN DE TEMPS ?)* : Quelle est la durée de cette action de maintenance ?

Les questions *POURQUOI*, *QUAND*, *QUOI* et *OÙ* sont les questions essentielles auxquelles une décision de maintenance doit répondre. En effet les questions *COMMENT* et *COMBIEN DE TEMPS,* d'ordre opérationnel, sont caractéristiques de l'action envisagée et peuvent être données par le plan de maintenance. Toutefois les réponses peuvent être considérées comme des contraintes sur les actions envisagées. Ainsi le tableau 1 synthétise les différents contextes de la décision à partir des définitions issues de (Cho et Parlar, 1991 ; Wang, 2002 ; Norme NF EN 13306 (AFNOR, 2001)) à travers les réponses aux questions *POURQUOI*, *QUAND*, *OÙ* et *QUOI*.

Les stratégies recensées dans le tableau 1 ont le point commun de se focaliser sur des objectifs de fiabilité ou de disponibilité. Or les organisations de maintenance ont toujours cherché à rationnaliser leurs propres coûts par le regroupement d'opérations. Plus récemment, d'autres vues ont été explorées pour chercher également à diminuer l'impact de la maintenance sur l'indisponibilité du système principal. Ces notions ont fait apparaître deux stratégies de maintenance visant à améliorer ces objectifs : les maintenances opportuniste et opportune. Toutefois vis-à-vis de la performance globale, l'objectif de limiter l'impact économique n'est pas suffisant. Ainsi une stratégie ayant pour objectif l'optimisation de critère représentatif du cycle de vie tel que le LCC doit être envisagée : dans ce cas est introduit le concept de stratégie proactive.

III.2.3. Vers de nouvelles stratégies de maintenance

La définition de la maintenance opportuniste ne fait pas l'objet d'un consensus global. Toutefois Thomas (Thomas *et al.*, 2008) en propose un état de l'art et montre qu'une action de maintenance opportuniste est une action associée à une action initiale déclenchée par :

- l'occurrence d'une défaillance (maintenance corrective) (Tatsuno *et al.*, 1990; Dekker *et al.*, 1997),
- la réalisation d'une action de maintenance préventive non prévisionnelle (maintenance systématique ou conditionnelle) (Berk et Moinzadeh, 2000).

Le composant faisant l'objet d'une telle action doit en outre posséder des propriétés de proximité vis-à-vis du composant faisant l'objet de l'action initiale. Ainsi E. Thomas (Thomas, 2009) montre que la maintenance opportuniste est en lien avec la notion d'opportunisme[15] et nécessite donc que la décision soit prise (en temps réel) en réaction à un événement. Dans le cas de maintenance prévisionnelle, il établit que la maintenance opportuniste n'est plus adaptée au contexte de proactivité où les décisions de maintenance portent sur des situations futures. Il introduit donc le concept de maintenance opportune portée sur la recherche des meilleures opportunités[16] possibles.

La maintenance opportune permet de décider d'une action de maintenance :

- planifiée durant un arrêt de production (action opportune de première espèce)
- planifiée sur un composant dégradé *D* (action *C*-opportune de seconde espèce) parallèlement ou successivement à une action planifiée de façon prévisionnelle sur un composant *C* et qui vérifie au moins l'une des conditions suivantes :

1. le composant *D* est proche de *C* au sens d'un critère de proximité (physique ou géographique) rigoureusement défini. Dans le cas où des enceintes (par exemple de confinement) existent dans le système, les deux composants sont situés dans la même enceinte ;
2. la gamme de consignation – déconsignation propre à cette action est identique à la gamme de consignation – déconsignation mise en œuvre pour l'action de maintenance sur le composant *C* ;
3. un flux de matière ou d'énergie relie l'un des composants à l'autre ;

[15] attitude consistant à modifier son comportement selon les circonstances de manière à en tirer avantage (définition proposée par le site www.le-dictionnaire.com)

[16] circonstance, occasion favorable (définition proposée par le site www.le-dictionnaire.com)

4. les deux composants participent à une même fonction identifiée du système ;
5. les outils et compétences nécessaires à l'accès au composant *C* permettent également d'accéder au composant *D* ;
6. si les deux actions de maintenance considérées sont opportunes de première espèce, et si les ressources disponibles permettent de réaliser ces deux actions simultanément, alors leur arrêt de production associé est le même.

La maintenance opportune s'appuie donc sur la maintenance prévisionnelle, et principalement sur sa capacité à évaluer le futur.

Les stratégies précédentes utilisent principalement des connaissances et informations issues des niveaux tactique et opérationnel (production et maintenance). Mais afin de mieux considérer la maintenance dans ses nouvelles missions et de conserver une vue globale de la performance, sur l'ensemble du cycle de vie du système, il devient nécessaire de lier aux décisions de maintenance des informations de niveau stratégique pour obtenir des objectifs tel que rationnaliser au mieux le LCC du système.

Ces perspectives sont intégrées au sein d'une stratégie que nous nommons *maintenance proactive* qui a pour objectif d'évaluer les options de maintenance en intégrant les aspects coût (coût de maintenance, coût d'approvisionnement mais aussi coût de perte sur les performances du système principal (perte de qualité, indisponibilité…)) et logistique. Ces informations sont fournies par des outils de gestion globale des ressources de type ERP[17] afin d'être intégrées dans une vision plus orientée vers le management de la santé du système. La prise de décision peut être effectuée au niveau de la maintenance mais également au niveau du contrôle du système principal ou du pilotage de la production. La maintenance proactive a donc besoin de l'évolution future du système et s'appuie pour cela sur la maintenance prévisionnelle.

Le tableau 2 propose les différents contextes de la décision pour les stratégies opportuniste, opportune et proactive afin de mettre en avant les différences avec les stratégies classiques. Ces différences sont présentées sur la figure 12 de façon schématique en fonction de leur position par rapport à la défaillance et par rapport aux informations utilisées. Ainsi la maintenance corrective intervient après la défaillance par l'utilisation de données provenant du système (constat de la défaillance). Les maintenances systématique et conditionnelle sont programmées avant la défaillance et utilisent des informations issues respectivement de système de type MES et de système de surveillance donnant des informations sur l'état du système lui-même. Elles sont reliées à la maintenance opportuniste car elles sont les éléments déclencheurs de celle-ci. La maintenance prévisionnelle nécessite des informations provenant du MES et du système, et elle est connexe à la maintenance opportune qui exploite ses résultats et les informations du système de gestion de la maintenance (i.e GMAO[18]) pour chercher au mieux les opportunités. Ces deux dernières sont contenues dans la maintenance proactive qui nécessite en supplément des informations vis-à-vis de la gestion globale de la vie du système. On voit ainsi que le cadre de la maintenance préventive n'intègre pas entièrement la maintenance proactive car les décisions pouvant être prise avec cette dernière peuvent être des décisions de maintenance ou de pilotage ou de gestion du système principal.

[17] Enterprise Resource Planning

[18] Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur

Tableau 2. Prise de décisions pour les nouvelles stratégies de maintenance

	POURQUOI ?	QUAND ?	OÙ ?	QUOI ?
Maintenance opportuniste	Rationnaliser localement les coûts d'indisponibilité et de maintenance	Une action de maintenance (corrective ou préventive non prévisionnelle) est programmée	Composant dégradé à proximité du composant visé par l'action de maintenance initiale	Action préventive décidée par l'expert sur la base du plan de maintenance
Maintenance opportune	Rationnaliser globalement les coûts d'indisponibilité et de maintenance	Une opportunité future par rapport à la production ou une action de maintenance prévisionnelle	Composant dégradé à l'instant futur à proximité de l'action initiale ou dont la maintenance est réalisable pendant un arrêt de production	Action opportune de première ou deuxième espèce
Maintenance proactive	Rationnaliser le LCC	Au moment le plus opportun vis-à-vis du LCC (doit tenir compte de la disponibilité du système, de la criticité de la mission, de sa qualité de réalisation…)	Composant dégradé le plus critique par rapport à l'évolution de la performance et du LCC (maintenance) ou action sur le système (pilotage)	Issue d'un processus d'aide à la décision portant sur des actions de : maintenance, pilotage du système ou modifications des missions

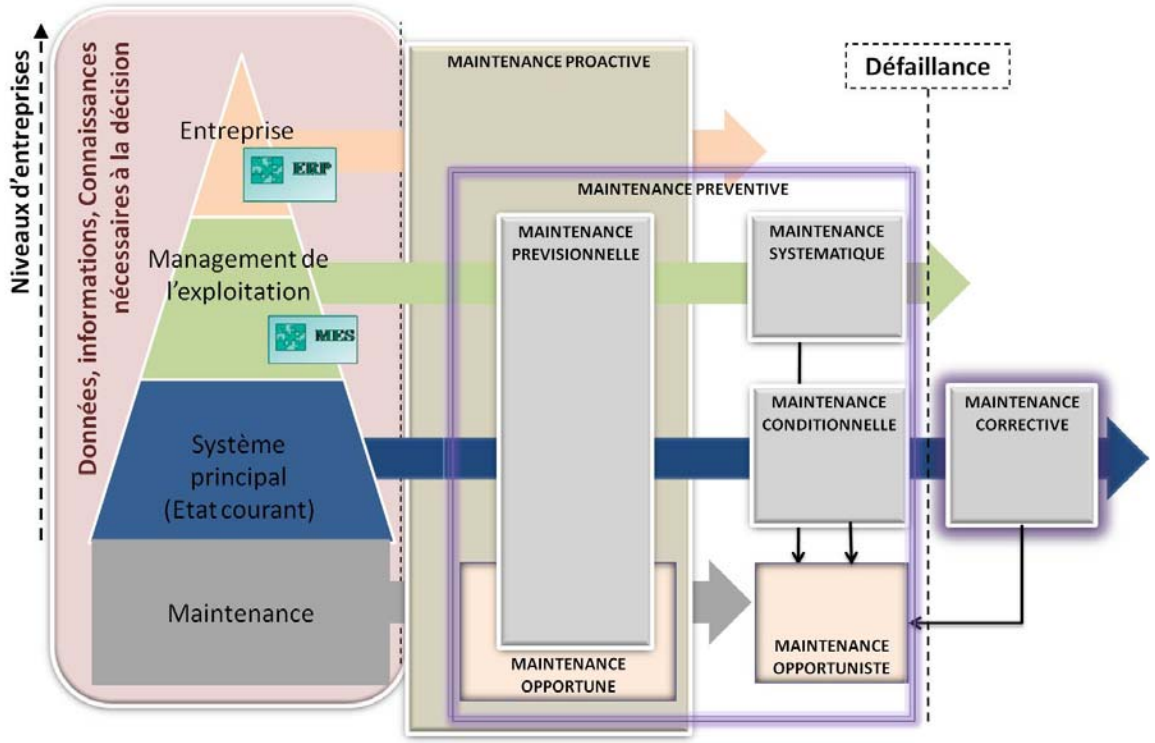


Figure 12. Positionnement relatif des stratégies de maintenance

Les caractéristiques de ces stratégies de maintenance peuvent être très différentes, que se soit en termes d'objectif à atteindre mais aussi de coût de développement. Ainsi l'ingénierie d'un système de maintenance demande de faire un choix dans l'ensemble des stratégies présentées. Cette phase de sélection doit estimer quelle sera la meilleure stratégie possible pour le système et ses performances, mais également à des niveaux plus locaux, c'est-à-dire pour chaque composant.

III.3. Sélection des stratégies de maintenance

La sélection des stratégies de maintenance est une étape fondamentale du cycle d'ingénierie de maintenance dans le cadre d'un soutien logistique intégré. Ce choix peut être effectué pour un composant ou un système multi-composants. Dans le premier cas la sélection est unique contrairement au second. En effet les exigences système du SM donnent les objectifs de maintenance à propos du système et de ses performances. Ces exigences sont dérivées aux niveaux sous-systèmes et ainsi de suite jusqu'aux composants. La contrainte est uniquement de répondre à l'ensemble des exigences de tous niveaux. Il n'est donc pas nécessaire d'avoir une stratégie de maintenance identique pour toutes les composantes du SP (système, sous-systèmes et composants). On peut ainsi définir deux niveaux de stratégie dont la sélection est détaillée dans les parties suivantes :

- La stratégie globale définissant la stratégie utilisée pour maintenir le système et ses performances (étape 4 de la définition du SLI - figure 9).
- La stratégie locale appliquée au niveau inférieur sous-systèmes/composants (étape 6 de la définition du SLI - figure 9).

III.3.1. Sélection de la stratégie globale

Le choix de la stratégie globale dépend du contexte du SP. Ce contexte est donné par les besoins des SP et SM ainsi que par la conception du SP. Pour faire le choix entre les différentes stratégies, des travaux ont déjà été menés. Une méthode de type « Analytic Hierarchy Process » (AHP) est une méthode couramment utilisée pour le choix de stratégie (Bertolini et Bevilacqua, 2000 ; Crespo Marquez, 2007). Bertolini et Bevilacqua (Bertolini et Bevilacqua, 2006) utilise également l'AHP associée à la méthode goal programming. Mais cette méthode s'appuie sur des critères non génériques car différents d'une application à l'autre. D'autres méthodes s'appuient sur l'analyse de risque (Crespo Marquez, 2007) ou des méthodes propres comme l'arbre de décision de (Waeyenbergh et Pintelon, 2004).

La problématique de sélection de la stratégie doit prendre en compte les critères issus de la définition du besoin et de l'environnement du système principal, mais également les effets induits par ce choix et notamment les coûts de développement des sous-processus spécifiques à chaque stratégie de maintenance et de leur déploiement. En effet, la mise en place d'une stratégie de maintenance induit un coût d'ingénierie des processus spécifiques dû à l'effort de modélisation de la connaissance sur le système : plus les modèles doivent intégrer de connaissance, plus le coût est élevé. Les stratégies portant sur la défaillance (corrective et systématique) demandent peu d'informations et sont donc peu coûteuses. La maintenance conditionnelle portant sur la dégradation courante nécessite une connaissance sur les évolutions des états du système amenant à la défaillance et s'appuie sur des modèles intégrant des informations provenant du système courant. La maintenance prévisionnelle s'appuie sur des modèles devant intégrer, en plus des informations utilisées par la maintenance conditionnelle, l'évolution de la dégradation future et l'impact des

conditions opérationnelles et environnementales. Enfin les stratégies opportune, opportuniste et proactive utilisent des critères d'évaluation des alternatives faisant appel à des informations de plus haut niveau.

La figure 13 synthétise ces points à travers une classification relative des stratégies en fonction des coûts d'ingénierie et des besoins de connaissance et informations. La maintenance opportuniste s'appuyant nécessairement sur une stratégie corrective, systématique ou conditionnelle, le coût de son ingénierie inclut les coûts de développement de ces dernières en supplément de ses propres coûts engendrés par la mise en œuvre de ses propres sous-processus.

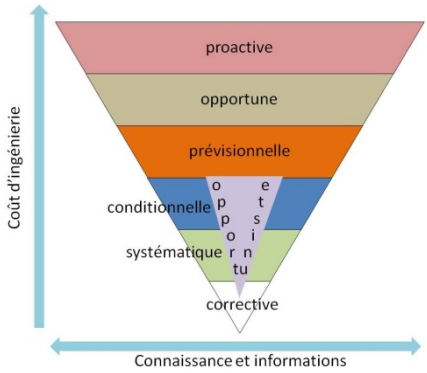


Figure 13. Positionnement relatif des stratégies de maintenance vis-à-vis de leurs coûts de modélisation

Le choix résulte donc du compromis entre les bénéfices attendus par l'exploitation des stratégies et les investissements pour l'ingénierie de celles-ci. Ces bénéfices doivent être définis à l'aide de critère portant sur le cycle de vie comme le LCC afin de prendre en compte l'ensemble des gains possibles sur la performance globale.

III.3.2. Sélection des stratégies locales

Les stratégies locales sont les stratégies appliquées aux sous-systèmes/composants de niveau inférieur. Celles-ci peuvent être différentes de la stratégie globale ou d'une partie du système à l'autre car le système est hétérogène :

- d'un point de vue performance, chaque partie n'affecte pas de façon équivalente les performances du système. Cette hétérogénéité peut être caractérisée à travers des critères de criticité, de sensibilité des performances à la dégradation du sous-système ou du composant, de détectabilité…
- d'un point de vue coût, elles peuvent avoir une forte disparité de coût de maintenance. Ce coût de maintenance provient du coût des opérations elles-mêmes (coûts temporels dus à l'indisponibilité engendrée, à l'utilisation des ressources humaines et matérielles) et du coût des consommables utilisés (pièces de rechange, huile…).

L'objectif principal du choix des stratégies locales doit être la garantie des performances fixées lors de la définition de la stratégie globale. L'objectif secondaire est de définir les stratégies locales en tenant compte des aspects de performance globale et de pertinence économique. Ainsi, des stratégies globales à fort besoin d'informations (proactive, opportune, prévisionnelle, et éventuellement conditionnelle) nécessitent d'être reportées sur les composants les plus influents sur

la performance. Cela signifie également que les composants qui ne sont pas jugés suffisamment influents peuvent se voir attribuer une stratégie plus simple (systématique par exemple).

À contrario, des systèmes dont la stratégie globale ne nécessite pas beaucoup d'informations ne contraignent pas de façon importante le choix des stratégies locales. Dans ce cas, c'est l'objectif secondaire qui permet de déterminer la stratégie pour chaque composant. On peut retrouver ponctuellement une stratégie à fort coût de développement appliquée à un composant ou un sous-système dont les performances ou les coûts sont critiques, alors que la majorité des composants est associée avec des stratégies plus simples.

III.3.3. Conclusion sur les stratégies de maintenance et leur sélection

Dans un point de vue de performance globale et du rôle de la maintenance au sein de l'entreprise, l'objectif serait de tendre vers le déploiement d'une stratégie de maintenance proactive. Cette stratégie nécessite la mise en place au préalable d'une maintenance prévisionnelle, élément central de la proactivité. Dés 1999, J.B. Léger (Léger, 1999) démontre les apports et l'intérêt de la maintenance prévisionnelle par rapport aux stratégies traditionnelles de maintenance, et notamment vis-à-vis de la maintenance conditionnelle. Comparativement à cette dernière, la maintenance prévisionnelle augmente, d'une part, la disponibilité instantanée par la prévision de la dégradation et, d'autre part, la disponibilité moyenne par la réalisation d'actions de maintenance en temps masqué. De plus, elle diminue, les dérives de la qualité de service et l'insécurité par le suivi des dégradations, ainsi que les coûts inhérents à la maintenance et aux pertes de production par une meilleure maintenabilité.

Si la maintenance prévisionnelle est prometteuse en termes de bénéfices attendus, elle est cependant la stratégie la plus difficile à mettre en œuvre. Le coût initial du développement de la maintenance prévisionnelle peut constituer une barrière infranchissable et, durant la phase de développement et d'implantation, des résultats "bénéficiaires" doivent être démontrés sous peine de réduction, voire d'immobilisation des investissements (Carnero, 2004). De plus, une approche prévisionnelle nécessite de disposer d'un retour d'expérience fiable et constant afin de collecter les informations et connaissances nécessaires à sa mise en œuvre.

IV. La maintenance prévisionnelle

La stratégie de maintenance prévisionnelle est supportée par un ensemble de processus communs à l'ensemble des stratégies de maintenance (figure 14) mais aussi par des processus spécifiques à celle-ci qui supportent entre autres les capacités d'anticipation. Les processus communs sont des processus internes à « stratégie et plan de maintenance » et « Ordonnancement » (Francastel, 1999). L'ensemble de ces processus interopèrent entre eux ainsi qu'avec d'autres processus appartenant aux autres composantes de l'entreprise par l'intermédiaire d'architectures supportant les processus et les flux informationnels échangés.

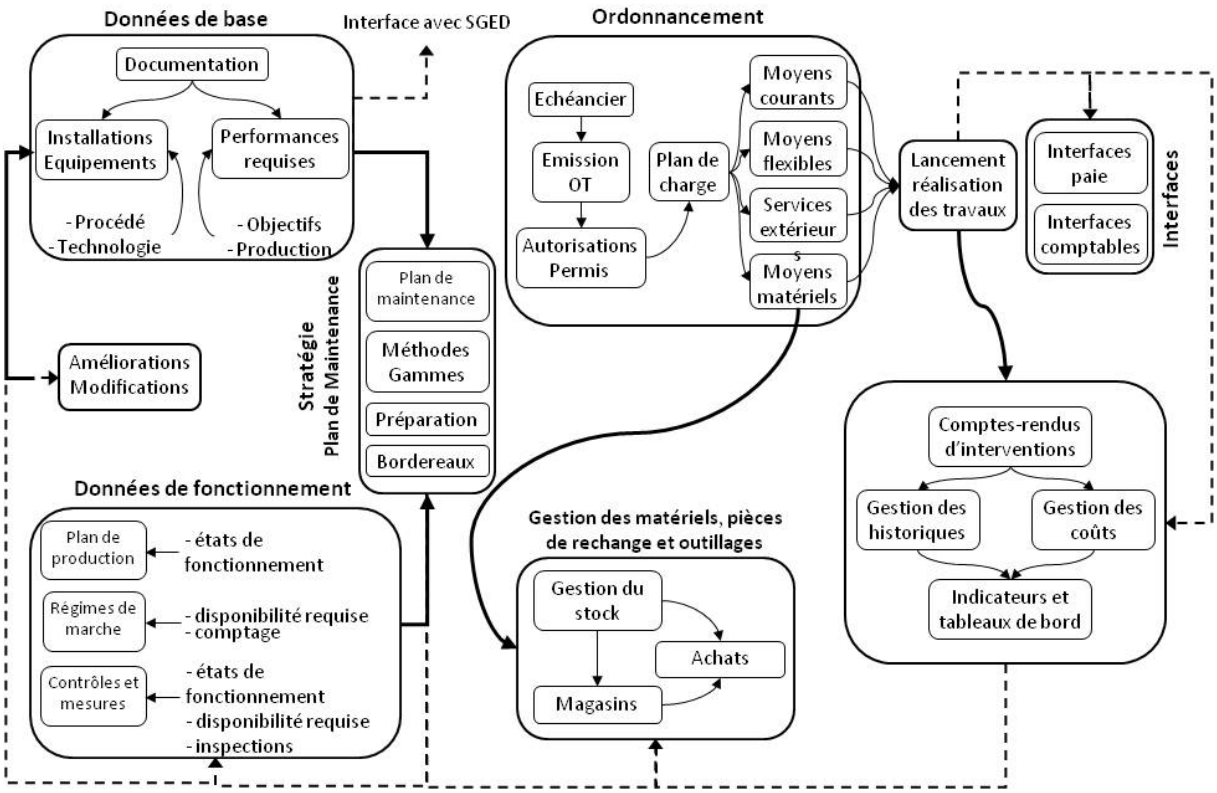


Figure 14. Les processus de la maintenance (Francastel, 1999)

IV.1. Les processus communs aux différentes stratégies de maintenance

Les stratégies de maintenance sont supportées par un ensemble de processus permettant de les piloter à différents niveaux. Levrat (Levrat *et al.* 2008) propose ainsi un cadre (figure 15) recensant l'ensemble des processus nécessaires au déploiement de ces stratégies dans un contexte de maintenance d'un système de production suivant les trois niveaux de la pyramide CIM[19] (stratégique, tactique et opérationnel) (Groover, 2007).

IV.1.1. Au niveau stratégique

Les processus de niveau stratégique représentent la prise de décision sur des horizons temporels importants. Les décisions stratégiques sont appliquées à des systèmes/sous-systèmes/ composants qui vont se succéder au cours de l'exploitation du SP. Les règles de décisions doivent être réutilisables au cours du temps, et reposent sur les comportements moyens. Ce niveau est composé de deux processus :

- le processus de définition de la stratégie (« To define a maintenance strategy cost/eco-efficient » de la figure 15),
- le processus de définition du plan de maintenance (« To define a maintenance plan cost/eco efficient » de la figure 15).

[19] Computer Integrated Manufacturing

IV.1.2. Au niveau tactique

Le niveau tactique joue le rôle de tampon entre le niveau stratégique établissant des plans de maintenance généraux et le niveau opérationnel qui suit la dynamique du système courant. Deux processus se situent à ce niveau :

- le processus de management (« To manage maintenance activities » de la figure 15) qui permet de mettre en place le plan de maintenance en ordonnançant les actions de maintenance
- le processus de décision (« To define a maintenance action cost/safe/eco efficient » de la figure 15) qui permet d'ajuster l'ordonnancement initial à l'état réel du système. Ainsi les décisions choisies n'ont pas pour objectif d'être réutilisables mais sont dédiées au moment présent ou futur proche. Dans le cadre de processus supportés par des activités automatisées, on parlera de processus d'aide à la décision. Ce dernier doit proposer plusieurs alternatives devant être comparées. Cela demande la définition d'un critère représentatif de l'impact de chaque alternative sur le système (e.g. l'impact sur les performances du système ou sur le LCC). Enfin, la prise de décision proprement dite est réalisée par l'expert de maintenance sur la base des informations précédentes.

Ces activités sont dépendantes des stratégies de maintenance pratiquées. Les alternatives proposées, mais surtout les critères d'évaluation et les informations utilisées pour calculer ces critères, diffèrent d'une stratégie à l'autre. Ces informations proviennent soit du niveau de gestion de l'entreprise (ERP), soit du niveau de management du système (MES), soit du système lui-même.

IV.1.3. Au niveau opérationnel

Le niveau opérationnel est le niveau le plus bas. Il est composé des processus les plus proches du système à maintenir :

- le processus d'évaluation de l'état courant (« To assess performance and condition of the equipment » de la figure 15),
- le processus de réalisation de l'action de maintenance.

IV.2. Les processus spécifiques de la maintenance prévisionnelle

Par rapport à ces processus génériques, la maintenance prévisionnelle vient ajouter un cadre particulier à la prise de décision de maintenance, la faisant reposer sur une évaluation de l'évolution future de l'état de santé du système et de ses performances. Pour cela, cette stratégie nécessite des processus spécifiques qui, selon la norme FD X60-000 (AFNOR, 2002), doivent :

- réaliser des mesures périodiques ou continues de paramètres observables et significatifs de l'état de dégradation du bien (avec l'usage d'un appareillage approprié),
- valider ces données, d'analyser leur évolution et d'établir un diagnostic en cas d'anomalie,
- extrapoler les mesures et les courbes de tendance en fonction de l'usage du bien et enfin,
- planifier des interventions de maintenance en fonction de la prévision du franchissement des seuils prédéterminés par retour d'expérience (REX).

Les trois premières actions permettent d'obtenir l'évolution future du système et n'ont de raison d'être que pour alimenter un processus d'aide à la décision aboutissant à la dernière action. Ainsi ces

processus ne peuvent être découplés et doivent être supportés au sein d'un même système : le système de maintenance prévisionnel (Leger, 1999).

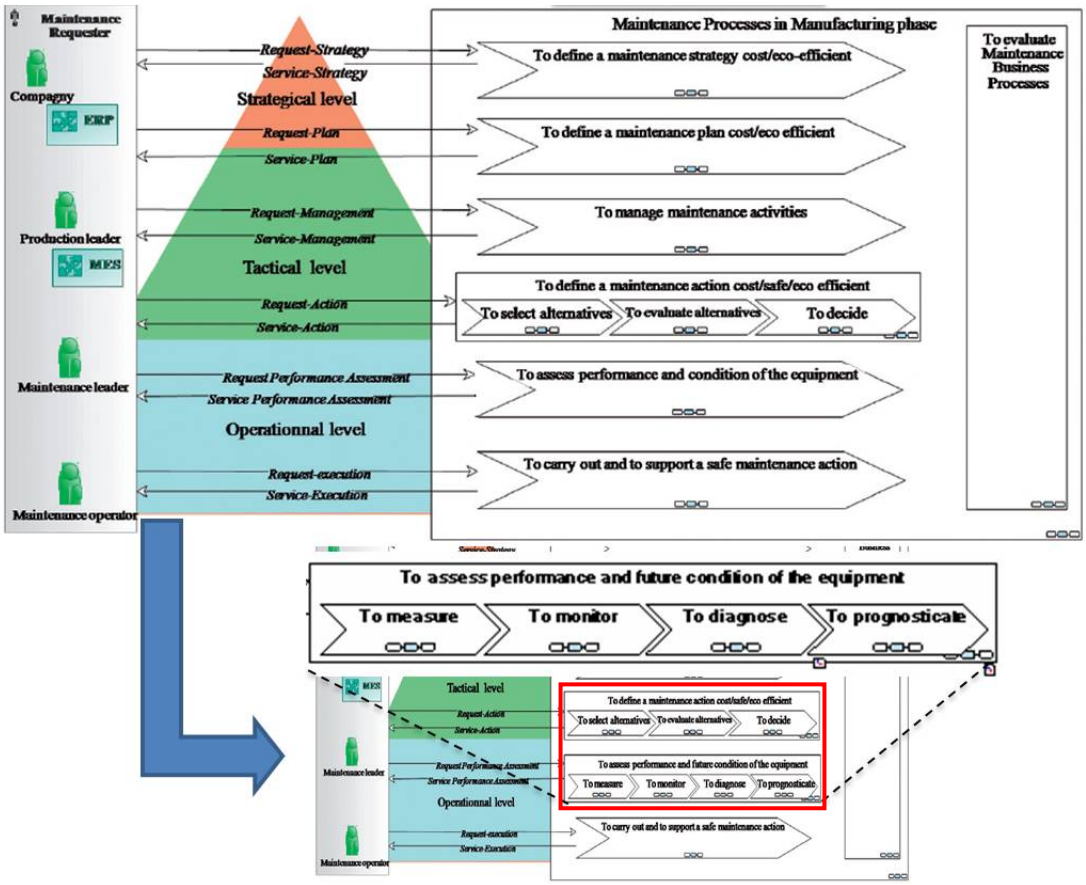


Figure 15. Processus spécifiques de la maintenance prévisionnelle au sein des processus globaux de la maintenance

Levrat (Levrat *et al.*, 2008) projette ce système de maintenance prévisionnelle sur les niveaux tactique (prise de décision) et opérationnel (processus spécifiques d'évaluation des performances et état futurs du système) (figure 15). Il est composé de quatre sous-processus matérialisant les fonctions recensées précédemment :

(1) processus de surveillance qui permet de mesurer de façon périodique ou continue (« to measure ») et qui traite ces données afin d'obtenir les informations nécessaires pour détecter l'émergence d'une dégradation ou d'une défaillance (« To monitor »),

(2) processus de diagnostic qui permet de déterminer le(s) mode(s) de défaillance en court et de le(s) localiser (« To diagnose »),

(3) processus de pronostic qui permet d'évaluer l'état de santé et les performances futures du système et de déterminer sa durée de vie résiduelle à l'aide de seuils prédéfinis (« To prognosticate »),

(4) processus d'aide à la décision qui permet de proposer un ensemble d'alternatives de maintenance au décideur (« To define a maintenance action cost/safe/eco efficient »).

Le processus de prise de décision se décompose en sous processus équivalents à ceux supportant d'autres stratégies de maintenance. C'est le contenu de ces sous-processus qui diffère, et notamment pour le processus d'évaluation des alternatives qui voit son critère d'évaluation évoluer. Ainsi ce critère porte sur des considérations fonctionnelles et dysfonctionnelles du système pour la stratégie prévisionnelle, sur des considérations économiques de la maintenance pour la stratégie opportune et sur des considérations économiques intégrées sur le cycle de vie du produit pour la maintenance proactive. Afin d'évaluer l'ensemble de ces critères, le processus de décision a besoin des informations concernant l'évolution future du système. De part sa capacité d'anticipation, cela fait du pronostic le processus central de la maintenance prévisionnelle. Toutefois il n'existe pas de consensus global sur la structure des systèmes supports de la maintenance prévisionnelle, notamment vis-à-vis de la position du pronostic. En ce sens la partie suivante dresse un inventaire des systèmes supports à la maintenance prévisionnelle les plus connus avec une focalisation sur le pronostic.

IV.3. Les systèmes supports à la maintenance prévisionnelle

Dans le but de mettre en œuvre cette stratégie en supportant concrètement les processus requis, plusieurs architectures fonctionnelles ont été proposées. Elles ont toutes le point commun d'être supportées par de nouvelles architectures recensées sous le vocable de *e*-maintenance. Ces architectures techniques reposent sur les NTIC et apportent les informations nécessaires à l'ensemble des systèmes de maintenance. Pour plus de détails sur ce que recouvre le concept de *e*-maintenance, des surveys sont disponibles (Muller *et al.*, 2008b ; Iung *et al.*, 2009).

OSA-CBM

Avec une volonté de standardiser une architecture « type » de maintenance conditionnelle et prévisionnelle (en anglais CBM : Condition-Based Maintenance), un ensemble de scientifiques et d'industriels américains ont proposé le cadre OSA-CBM (Open Systems Architecture for Condition-Based Maintenance) (Lebold *et al.*, 2001). Cette architecture présentée dans la figure 16, est structurée en sept couches, créant une succession linéaire des processus nécessaires pour mener à bien ces maintenances. Les trois premières couches permettent d'acquérir les mesures et de les mettre en forme afin d'obtenir des indicateurs adaptés.

Sur cette base, le processus « Health assessment » permet d'agréger les informations précédentes en connaissances sur la santé du système (niveau de dégradation physique et niveau de performance) et, bien que cela ne soit pas dit explicitement, détermine les modes de défaillance courants et leur localisation (diagnostic). Le pronostic permet de définir l'état futur du système en considérant la connaissance précédente et l'environnement futur du système (sollicitations, conditions environnementales) et alimente un processus d'aide à la décision. Une dernière couche réalise les fonctions d'interfaces homme-machine.

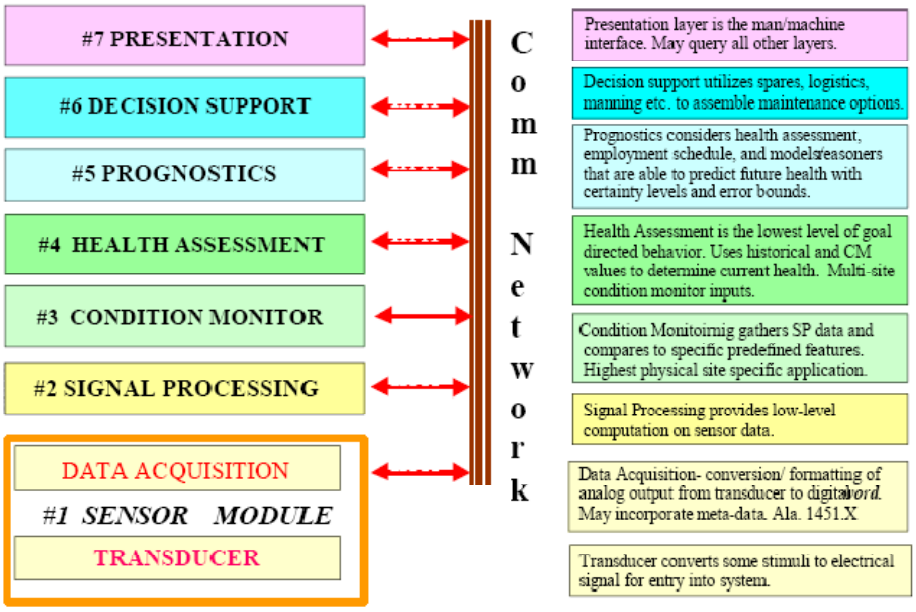


Figure 16. Couches de l'architecture OSA-CBM

WatchDog™

Le WatchDog™ permet d'allier un composant physique (hardware) et logiciel (software) contenant ainsi toute la connaissance nécessaire (modèle, méthode…) (Lee, 1998). Djurdjanovic (Djurdjanovic *et al.*, 2003) en proposent l'architecture où, à partir de la mesure des données, de leur filtrage et de la construction des indicateurs, ils réalisent en parallèle l'évaluation de l'état de santé du système, son diagnostic et son pronostic (figure 17). Les activités de mesure de données sur le système réel et d'aide à la décision sont réalisées en dehors du WatchDog™.

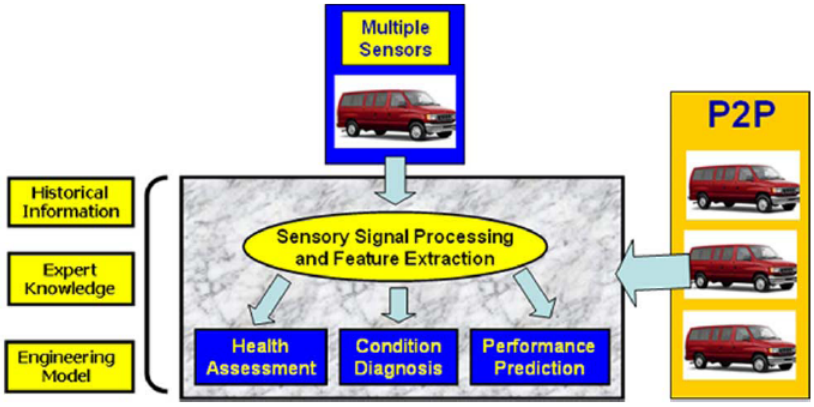


Figure 17. Structure du WatchDog™

PEDS : Prognostic Enhancements to Diagnostic Systems

Le PEDS (Prognostic Enhancements to Diagnostic Systems) proposé par (Byington *et al.*,2002) distingue deux modules de pronostic différents, regroupant ainsi les deux approches précédentes : le pronostic horizontal (comparable aux travaux d'OSA-CBM) et le pronostic vertical (comparable au WatchDog™) (figure 18).

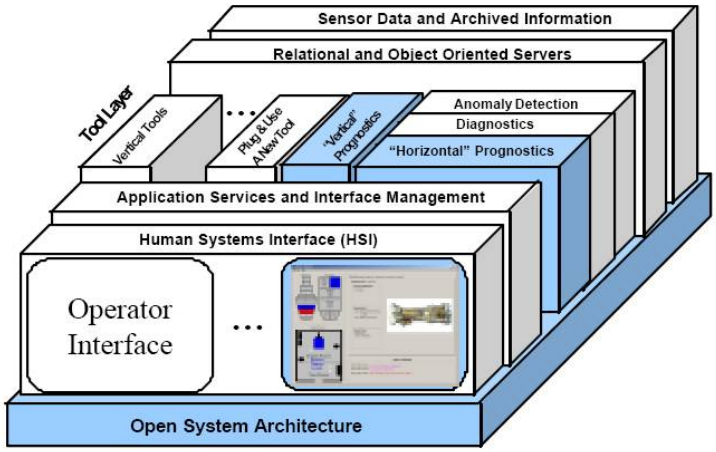


Figure 18. Structure du PEDS de type « toaster » (Byington *et al.*, 2002)

Le pronostic horizontal est un processus de pronostic effectué de façon séquentielle suite à des activités de détection de faute et de diagnostic. En se basant sur le résultat de ce dernier, le pronostic n'utilise qu'un sous-ensemble de ses modèles existants : ceux qui représentent les modes de défaillance en cours sur le système, qui ont été paramétrés et ajustés durant des phases hors ligne et qui modélisent l'évolution de la dégradation du système pour des modes de défaillance spécifiques[20]. Ces modèles ont, en théorie, l'avantage d'être plus précis car ils intègrent la connaissance d'un nombre réduit de modes de défaillance, représentant un nombre réduit de comportements possibles.

Le pronostic de type vertical ne s'appuie pas de façon explicite sur les résultats d'un diagnostic. Il représente des modèles statistiques de la défaillance (et non de la dégradation) ou des modèles de pronostic de données. Ces modèles peuvent avoir été paramétrés hors ligne de la même façon que précédemment à l'exception du fait que les données d'apprentissage n'ont pas été segmentées en fonctions des modes de défaillance. Ils peuvent également s'auto-adapter en ligne, c'est-à-dire qu'ils ne subissent pas de phases de paramétrages hors ligne[21]. Ils contiennent la connaissance d'un ensemble (voire de la totalité) des comportements du système et sont donc moins précis car moins explicites. Ils ont toutefois l'avantage d'autoriser la mise en place des stratégies de maintenance prévisionnelles lorsque la connaissance dysfonctionnelle est faible.

SIMP : Système Intégré de Maintenance Prévisionnelle

La thématique « maintenance prévisionnelle » a été également abordée au sein du CRAN. Jean-Baptiste Leger propose dans sa thèse de doctorat dès 1999 Léger (Léger, 1999) un cadre formel de modélisation du système de maintenance prévisionnelle en prônant une vision intégrée de celui-ci au sein du système d'information de l'entreprise. Dans cette continuité, la thèse d'Alexandre Muller (Muller, 2005) définit plus particulièrement un Système Intégré de Maintenance Prévisionnelle

[20] On retrouve ainsi des modèles basés sur la physique, mais aussi des modèles obtenu par apprentissages sur des données segmentées selon les modes de défaillance en cours.

[21] Des modèles de type régression/extrapolation de courbe, ARMA…

(SIMP) dans le domaine d'application des systèmes manufacturiers. Le SIMP est un système[22] intégré (coopérant avec les autres processus de l'entreprise : MCO, production…) de maintenance prévisionnelle. La notion de SIMP est donc synonyme d'une double intégration : interne (inter-processus du SIMP) et externe entre les processus du SIMP et les autres processus de l'entreprise (figure 19).

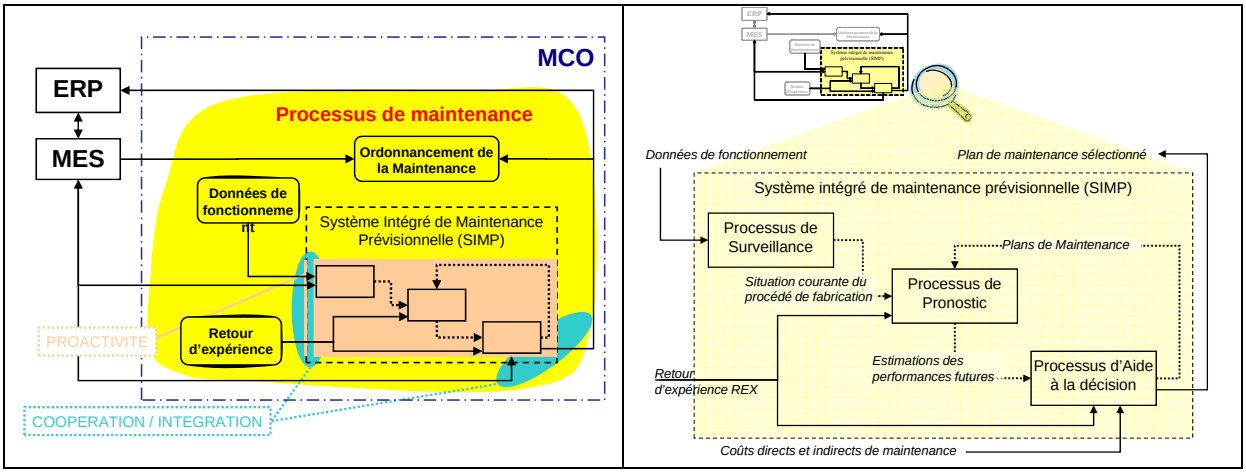


Figure 19. Architecture du SIMP (Muller, 2005)

Ce travail permet de définir la place du système de maintenance prévisionnelle au sein de l'entreprise et du besoin de relation et d'intégration entre la maintenance et les autres systèmes de l'entreprise supportant les activités de gestion de la production (MES) ou de gestion globale de l'entreprise et des coûts (ERP).

Cette proposition définit également la succession des trois sous-processus (surveillance[23], pronostic et aide à la décision). Elle fait apparaître une boucle entre les deux derniers sous-processus réalisée par le flux « Plans de Maintenance ». Ce flux, entrée du pronostic et produit par l'aide à la décision, permet de considérer des alternatives futures de maintenance. Dans ce cadre, le pronostic remplit donc deux fonctions :

- Tout d'abord il permet d'évaluer l'évolution future du système dans ses missions en intégrant les actions de maintenance éventuellement programmées à l'instant courant. Le résultat du pronostic est ensuite transmis à l'aide à la décision (sous-processus « sélectionner les alternatives de maintenance »).
- Dans un deuxième temps le pronostic est exploité afin de déterminer pour chaque alternative l'évolution future du système en considérant l'alternative comme le scénario de maintenance (et de production dans le cas d'une maintenance proactive) que subira le système. Il s'agit d'évaluer l'impact des scénarios sur la santé du système et ses performances et de fournir ainsi des informations aux processus d'évaluation lui permettant de classer les alternatives suivant les critères retenus. Ainsi fonctionnellement le sous-processus « évaluation des alternatives de maintenance » est supporté partiellement par le pronostic.

[22] Au sens d'un ensemble de processus en interaction entre eux et avec l'environnement, intégré pour rendre à son environnement les services correspondants à sa finalité

[23] réalisant les activités de détection/diagnostic

Ces deux rôles mettent en lumière l'importance du pronostic dans les systèmes de maintenance prévisionnelle comme le SIMP dont il est le processus clé. Paradoxalement, sa relative jeunesse fait également de lui le « talon d'Achille » des systèmes de maintenance prévisionnelle (Wang et Vachtsenavos, 1999) par son manque de formalisation (Jardine *et al.*, 2006). L'intégration du processus de pronostic dans le système de maintenance prévisionnelle, sa modélisation et la formalisation de son principe de construction constituent aussi bien des problématiques académiques (GT MACOD, 2003) qu'industrielles (Byington *et al.*, 2004a). Pour toutes ces raisons, il est l'objet central de notre travail de thèse.

V. Conclusion

Les nouvelles considérations de la performance d'un système impliquent de nouvelles évolutions pour les approches censées permettre leur maîtrise dans un point de vue global et sur l'ensemble du cycle de vie. Ceci passe nécessairement par l'émergence de nouvelles stratégies et pratiques de maintenance et notamment dans une vision proactive. Ces innovations entraînent des modifications dans les méthodes de conception de la maintenance pour rationaliser son coût global sur la vie du système : l'ingénierie de maintenance est intégrée avec l'ingénierie du système principal à travers une ingénierie des exigences communes suivant les concepts du SLI. Pour maîtriser les performances du système principal dans une approche proactive, cette ingénierie doit également permettre le développement de stratégie de maintenance prévisionnelle.

La maintenance prévisionnelle est supportée par des systèmes de maintenance prévisionnelle composés d'un ensemble de processus dont le pronostic est le processus clé (Muller, 2005). En effet, celui-ci supporte les capacités de projection dans le futur nécessaire à la proactivité. Ce processus fait l'objet depuis une dizaine d'années de plus en plus de considération de la part des mondes industriel et académique. Mais il manque toujours des propositions apportant des réponses génériques à son besoin de formalisation, de méthodes et de modèles nécessaires à sa diffusion dans le monde industriel. Aussi nous proposons dans le chapitre suivant une étude plus précise et complète des apports et des limites des contributions scientifiques et industrielles actuelles relatives au pronostic.

Chapitre 2 : Modélisation générique du pronostic système

I. Introduction

L'émergence de la stratégie de maintenance prévisionnelle au milieu des années 1990 a eu pour effet, entre autres, vis-à-vis de la communauté scientifique une initialisation de travaux de recherche sur le processus clé de pronostic et sa formalisation. Cependant la communauté « pronostic » reste encore jeune comparativement à d'autres comme celle du diagnostic plus mature et mieux structurée (Wang et Vachtsenavos, 2001). De plus, le développement du pronostic à l'échelle industrielle est encore limité par sa difficulté à considérer des systèmes de grande dimension. En effet, il manque encore cruellement de concepts, de méthodes, d'outils... « *We simply do not know how to measure the performance degradation of components and machines, we lack the validated predictive models and tools that tell us what would happen when the process parameters decrease from values* » (Lee, 1998).

Par rapport à ce contexte, le but de ce chapitre est tout d'abord de présenter les grandes orientations de la communauté « pronostic » et de ses travaux à travers un bilan de la terminologie utilisée, un historique de l'évolution de la communauté et une étude bibliographique permettant d'établir une vue d'ensemble en y soulignant des problématiques non traitées. Ce constat aboutit à la proposition d'un pronostic système générique qui doit évaluer l'ensemble des performances et des dégradations d'un système multi-composants en prenant en compte le contexte opérationnel futur. Une modélisation générique de son environnement est proposée pour décrire les objectifs (flux sortant) en fonction des informations disponibles (flux entrants). À ce modèle est associée une décomposition en sous-processus génériques permettant de décrire les actions à réaliser pour obtenir un résultat de pronostic. Ces modèles font émerger des concepts nécessitant des outils de modélisation. Pour y répondre, un ensemble de verrous scientifiques est identifié.

II. Communauté du pronostic et état de l'art des travaux

II.1. Les définitions du pronostic

Le terme pronostic provient du grec progignôskein qui signifie "connaître à l'avance". Ce processus est associé au concept de Condition-Based Maintenance (CBM) (Jardine *et al.*, 2006), et plus spécifiquement à la maintenance prévisionnelle. Il a pour but de prévoir l'état futur d'un système, d'un équipement ou d'un composant élémentaire (mécanique, hydraulique, électronique, …).

Le besoin de connaître le futur est une problématique en lien avec nombre de disciplines scientifiques : météorologie, finance, médecine ou, ce qui nous intéresse plus précisément ici, la maintenance des matériels dans des domaines comme l'aérospatiale, l'électronique ou l'automobile (Saxena *et al.*, 2008). Toutefois, pour les deux premières disciplines, on parle de prédiction à la différence de la médecine et de la maintenance où l'on emploie le terme de pronostic.

Dans le cadre médical, le praticien utilise des résultats de modèles de pronostic afin de déterminer le traitement le plus adéquat. Ces modèles de pronostic reposent sur des outils mathématiques simples (e.g. arbre de décision, probabilité conditionnelle) ou plus sophistiqués (e.g. processus de Markov, réseaux de neurones, algorithmes génétiques) (Lucas et Abu-Hanna, 1999). Une grande difficulté rencontrée est la capacité à modéliser l'évolution continue de la maladie, car elle dépend de la variabilité d'un patient à l'autre et du nombre très important de facteurs influents, dont il n'est pas possible de connaître les évolutions passées voire futures. Cela amène les médecins à ne considérer

que des modèles probabilistes semblables aux modèles à états ou aux modèles de durée de vie des matériels industriels (Uckun *et al.*, 2008). Ainsi le pronostic médical peut être défini comme la connaissance de la probabilité d'être dans un état à une date future (probabilité de survie, de rétablissement,…) pour un patient atteint d'une pathologie.

Dans le cadre de la maintenance des systèmes industriels, un grand nombre de définitions a été donné proposant des finalités différentes et/ou des informations d'entrée différentes. Cette discordance est particulièrement visible à travers la terminologie anglaise qui comporte plusieurs mots (« prognosis/prognostic/prognostics ») là où la langue française ne propose que pronostic.
On peut toutefois considérer que le mot « prognosis » est peu différent du terme « prognostic ». Le premier est utilisé plus rarement dans le cadre des systèmes industriels et fait plutôt référence au pronostic médical[24].
Pour Byington (Byington *et al.*, 2002), qui font partie des pionniers dans ce domaine: « *Prognostic is the ability to predict the future condition of a machine based on the current diagnostic state of the machinery and its available operating and failure history data.* » Cette définition met en évidence la nécessité pour le pronostic de s'intégrer dans son environnement informationnel, pour obtenir les informations (passées ou courantes) nécessaires à sa mise en œuvre.
Pour Lebold (Lebold *et al.*, 2001) : « *The primary function of the prognostic is to project the current health state of equipment into the future taking into account estimates of future usage profiles.* » Cette définition apporte un point de vue supplémentaire puisqu'elle indique qu'il faut prendre en compte dans le pronostic l'état courant du système, mais également des connaissances disponibles sur les utilisations futures du système. D'autres définitions sont rassemblées par (Goh *et al.*, 2006) et montrent la grande hétérogénéité des visions du pronostic.

« Prognostics » est un mot dont l'utilisation en maintenance a récemment émergé dans la littérature. Il est notamment intégré au concept de « Prognostics and Health Management » (PHM) et porte en lui une vision plus système (maintenance de systèmes et système de maintenance). Dans (Kalgren *et al.*, 2006) les auteurs définissent les deux termes « Prognostics » et « Prognosis » par:

- « *Prognostics and Health Management (PHM) is a health management approach utilizing measurements, models, and software to perform incipient fault detection, condition assessment, and failure progression prediction.* »
- « *Prognosis is a reliably and accurately forecast the remaining useful life or risk to complete a planned mission. Track and trend the progression in gray-scale health and produce a RUL based on a predescribed HI threshold. Uncertainty bounds or confidence intervals should be applied and accompany the prediction*. »

Ces deux définitions permettent de mesurer la différence entre prognosis/prognostic qui concerne le processus de prévision de la durée de vie résiduelle d'un matériel et prognostics qui regroupe l'ensemble des processus permettant d'aboutir à un résultat de pronostic, c'est-à-dire les processus

[24] Définition de *prognosis* de http://dictionary.reference.com :

1. *Medicine/Medical*. a forecasting of the probable course and outcome of a disease, esp. of the chances of recovery.
2. a forecast or prognostication.

Définition de *prognostic* de http://dictionary.reference.com :

1. a forecast or prediction.
2. an omen or portent; sign.

de mesure, de détection, de diagnostic et de pronostic proprement dit (« prognostic »). Peng (Peng *et al.*, 2010) abondent dans ce sens : « *Prognostics addresses the use of automated methods to detect, diagnose, and analyze the degradation of physical system performance, calculating the remaining life in acceptable operating state before failure or unacceptable degradation of performance occurs* ».

Enfin, depuis 2004, la norme ISO 13381-1 décrit de façon standard ce que devrait être le processus de pronostic, sans en proposer de modélisation. Le pronostic y est défini par : « *Estimation de la durée de fonctionnement avant défaillance et du risque d'existence ou d'apparition ultérieure d'un ou de plusieurs modes de défaillance*». Si cette définition ne prend pas en compte la nécessité d'inclure un scénario d'utilisation future, elle apporte deux aspects importants et complémentaires au pronostic. Tout d'abord elle précise que le résultat du pronostic doit être formulé sous la forme d'une durée de vie résiduelle (Remaining Useful Life : RUL). Cette définition intègre également la notion de mode de défaillance courant et de mode de défaillance potentiel (qui n'aurait de réalité physique que dans le futur).
Puisque nous considérons dans ce travail que le processus de pronostic est un constituant du système de maintenance prévisionnelle au même titre que les processus de surveillance et diagnostic (voir chapitre 1), le mot pronostic utilisé ici fait référence aux définitions précédentes de « prognosis » ou « prognostic », et il peut se résumer comme étant le processus qui :

- prévoit l'état futur du système et
- donne les durées de vie résiduelles pour les modes de défaillances détectés et induits
- en considérant les informations passées (historiques) et/ou présentes (état courant) et voire futures (missions futures du système).

II.2. Evolution historique de la communauté pronostic

Au-delà de la terminologie, la communauté s'est agrandie au cours de ces vingt dernières années et les travaux menés ont fait émerger une évolution des schémas de pensée, passant de visions centrées sur l'état des composants vers de nouvelles approches système et performance.

II.2.1. Au niveau des structures

La figure 20 retrace les principales évolutions et faits marquant cette évolution des travaux autour du pronostic ainsi qu'en parallèle les principaux travaux réalisés au CRAN. Le développement des technologies de mesure et de traitement de l'information dès le milieu des années 1980 ont permis d'augmenter l'intérêt pour des stratégies de maintenance basées sur l'état réel des matériels (condition-based maintenance) et en premier lieu la maintenance conditionnelle. C'est dans ce contexte qu'a émergé au milieu des années 1990 la stratégie prévisionnelle et les premiers travaux sur le pronostic.

Fin des années 1990, d'importants programmes industriels se sont intéressés au pronostic. Ainsi la NASA voit dans celui-ci un moyen d'évaluer les risques de maintenance lors de missions spatiales (James et Dubon, 2000). De même le département de la défense américain qui a lancé le programme JSF[25] inscrit la problématique du pronostic dans celui-ci (Hess, 2001 ; Smith *et al.*, 1997) avec un objectif de réduction globale des coûts sur le cycle de vie du matériel. Les impacts de ces décisions

[25] Joint Strike Fighter

sont visibles à travers la création de sessions spécifiques au pronostic dès 2001 au sein de la conférence IEEE Aerospace Conférence[26].

À cette période, chercheurs industriels et académiques se sont regroupés au sein d'entreprises positionnées sur ces nouvelles technologies (e.g. *Impact Technologie*[27] aux Etats-Unis et *Predict*[28] en France) ou au sein de centres de recherche adossés à une université (e.g. *IMS (Intelligent Maintenance System) Center*[29] des universités de Cincinnati, du Missouri et du Michigan). Plus récemment cette structuration a connu une accélération avec la création de centres de recherche comme celui de la NASA (*Prognostics Center of Excellence*[30]) en 2006, de l'université du Maryland (*PHM Group of the CALCE*[31]) et de l'Université de Hong Kong (en partenariat avec l'université du Maryland : *CityU Center for Prognostics and Systems Health Management*[32]) en 2008/2009. En France l'association DIAG21 créée en 2009 a pour vocation de fédérer des industriels et des universitaires dans le domaine.

En parallèle de ces initiatives, la communauté a eu besoin de lieux et d'événements permettant de se rencontrer et d'échanger. Ainsi des groupes de travail ont été créés au sein de l'IFAC[33] (WG *A-MEST*[34]) et de l'ESReDA[35](*Maintenance Modelling and Applications Project Group*). De plus, adossée à la communauté IEEE[36], une société savante a été créée en 2008 sous le nom de PHM Society[37]. Ces structures ont permis la mise en place de conférences spécifiques à cette thématique :

- Conférence annuelle de la PHM Society (depuis 2008),
- IEEE - Prognostics & System Health Management Conference organisée par le *CityU Center for Prognostics and Systems Health Management* (depuis 2010),
- Workshop IFAC A-MEST (depuis 2010)

[26] Programme de la conférence :
http://www.aeroconf.org/2003%20Final%20Database/2002NewWebFrontMatter/PrintedTOCNoComm.pdf

[27] http://www.impact-tek.com/

[28] http://www.predict.fr/

[29] http://www.imscenter.net/

[30] http://ti.arc.nasa.gov/tech/dash/pcoe/

[31] http://www.prognostics.umd.edu

[32] http://www.cityu.edu.hk/phmc

[33] International Federation of Automatic Control

[34] Working Group Advanced Maintenance Engineering, Services and Technology

[35] European Safety, Reliability and Data Association

[36] Institute of Electrical and Electronics Engineers

[37] http://www.phmsociety.org/

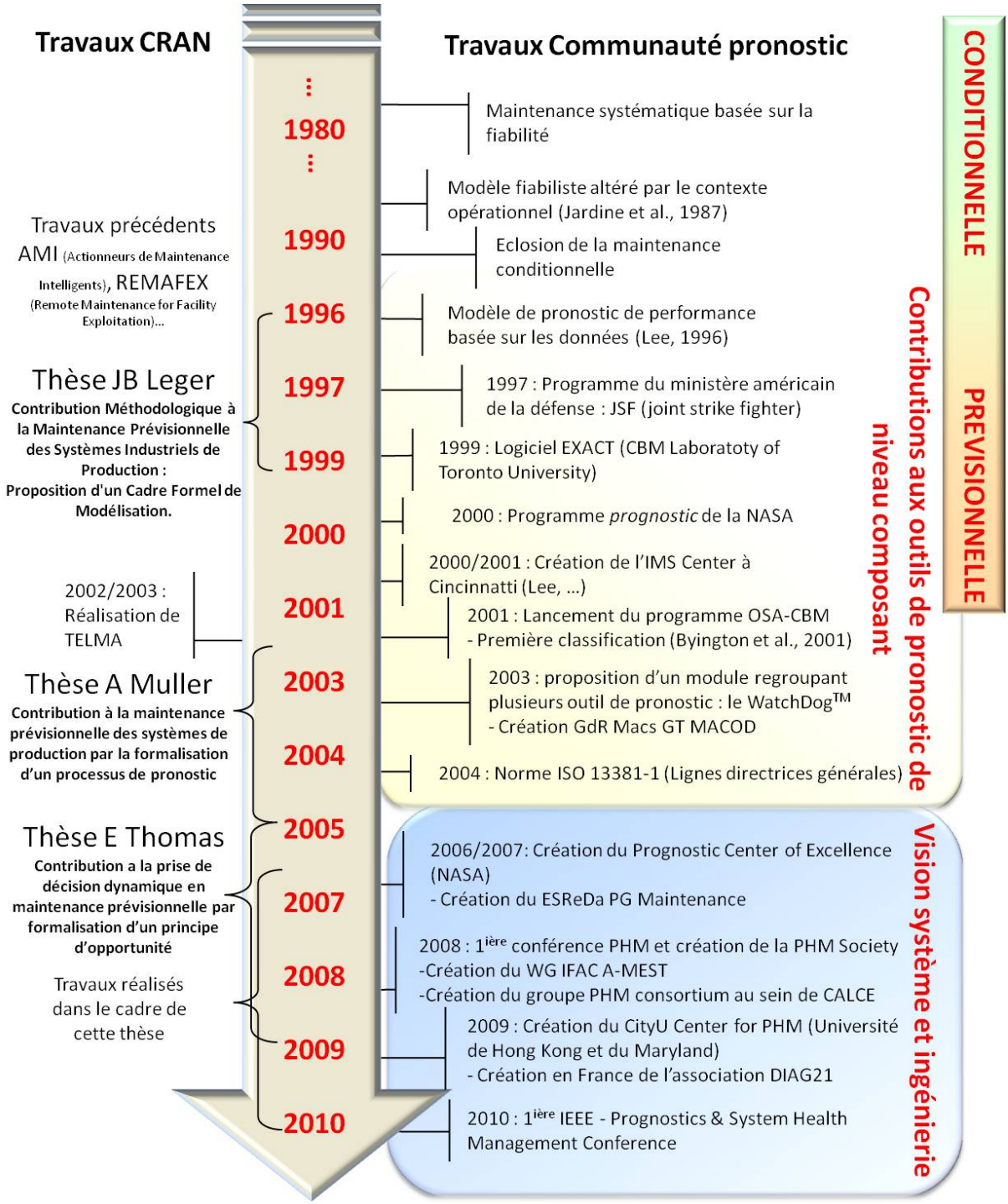


Figure 20. Evolution des travaux concernant le pronostic au sein du CRAN et de la communauté

Au niveau national des structures comme les GT MACOD[38] et S3[39] du GdR MACS[40] ont également intégré dans leurs travaux la problématique de pronostic et le nombre de thèses de doctorat réalisées dans les laboratoires français est en constante augmentation (Muller, 2005 ; Desinde, 2006 ; Diez Lledo, 2008 ; Vasile, 2008 ; Peysson, 2009 ; Ribot, 2009 ; Schutz, 2009).

[38] Groupe de Travail Maintenance Collaborative et Distribuée (www.univ-valenciennes.fr/GDR-MACS/macod/)

[39] Groupe de Travail Sûreté / Surveillance / Supervision (http://perso.ensem.inpl-nancy.fr/Didier.Maquin/S3/)

[40] Groupe de Recherche Modélisation, Analyse et Commande des Systèmes (www.univ-valenciennes.fr/GDR-MACS/)

II.2.2. Au niveau des objectifs de recherche

La majorité des travaux portent sur les outils de projection et l'obtention du meilleur résultat de prédiction possible. Ces approches sont principalement mises en œuvre sur un composant spécifique ou une famille de composants particuliers (e.g. roulements à billes, engrenages). On peut néanmoins citer les travaux du consortium OSA-CBM (dès 2000/2001) et ceux aboutissant à la définition de la norme ISO 13381-1 (ISO, 2004) qui furent les premiers travaux apportant une certaine généricité. L'ensemble de ces approches reste centré sur la recherche de la défaillance future sans repositionner les composants dans leur environnement, c'est-à-dire le système à maintenir. Elles ne permettent donc pas de passer au niveau système qui demande de considérer l'impact des dégradations des composants sur lui-même et ses performances.

Toutefois depuis 2007/2008 on constate une augmentation des travaux relatifs aux problématiques de pronostics de systèmes et de leurs performances contenant des réflexions sur les liens reliant les différents niveaux d'abstraction. La complexité générée par la mise en œuvre de ces pronostics a fait également apparaître le besoin d'ingénierie pour guider et évaluer la conception de la structure à déployer au plus tôt, qui se traduit par l'émergence de premières propositions (Walker et Kapadia, 2009).

En parallèle de la communauté, plusieurs travaux de recherche ont été réalisés sur ces thématiques au sein du CRAN. La thèse de J.B. Léger a permis dès 1999 de fournir un cadre de modélisation à la maintenance prévisionnelle (Léger, 1999) dans lequel les travaux d'A. Muller ont pu s'inscrire à travers une première formalisation du pronostic (Muller, 2005). Ces travaux ont abouti à une méthodologie de construction des modèles de pronostic basée sur la connaissance experte et supportée par les réseaux bayésiens permettant d'obtenir les performances futures du système. Les travaux de thèse d'E. Thomas ont porté sur les problématiques de décision dynamique basée sur les résultats d'un processus de pronostic et ont défini dans ce cadre le concept de maintenance opportune (Thomas, 2009). Les travaux présentés ici se situent dans la continuité des travaux portant sur les pronostics de système.

II.3. Etat de l'art et classifications des approches du pronostic

Sur la base de l'historique réalisé, l'objectif est maintenant de proposer un état de l'art actuel des travaux sur le pronostic permettant de mettre en valeur, vis-à-vis de la communauté pronostic, les points forts et les insuffisances. Plusieurs travaux présentés ci-dessous ont déjà proposé des classifications permettant de cartographier les travaux de la communauté, cependant sans réellement identifier les verrous scientifiques émergents. Nous proposons ainsi une classification nous permettant de mettre en évidence des problématiques quelque peu différentes de celles identifiées à ce jour.

II.3.1. Les classifications existantes

Lebold et Byington (Lebold et al., 2001 ; Byington et al., 2002) ont, les premiers, proposé un classement purement porté sur les modèles de projection, repris par d'autres travaux (Muller, 2005 ; Peysson, 2009 ; Patrick-Adalco, 2007). Ils font état d'une hiérarchisation en trois classes d'approches (figure 21) du pronostic :

- Approches basées sur les modèles : elles s'appuient sur des modèles issus des loi physiques ainsi que des modèles de dégradation construits par expérimentation (Goebel et Bonissone,

2005 ; Mathur *et al.*, 2001) permettant d'obtenir une représentation mathématique du mécanisme de dégradation (Luo *et al.*, 2008).

- Approches basées sur les données : elles s'appuient sur l'utilisation de données directement mesurées sur le système ou d'indicateurs calculés à partir de celles-ci. Ces données peuvent représenter l'état actuel issu du système de surveillance et/ou l'état passé issu d'historiques de mesures obtenus lors d'utilisations passées d'équipements similaires. Dans ce cadre on peut distinguer des pronostics :
    - par analyse de tendance : prédiction de l'évolution future d'un indicateur par l'ajustement d'un modèle à l'aide des données représentatives de l'état courant (prédiction par série temporelle, régression…),
    - par apprentissage : ces approches sont supportées par des modèles issus de l'intelligence artificielle qui utilisent les historiques de la dégradation lors d'une phase d'apprentissage afin d'ajuster les paramètres du modèle. Les réseaux de neurones et les outils neuro-flou constituent les principaux outils pour ces approches,
    - par estimation d'état : ces approches sont utilisées notamment lorsqu'un diagnostic par reconnaissance de formes est mis en œuvre au préalable (Denœux *et al.*, 1997). Dans ce cas le pronostic consiste à prédire l'évolution de la trajectoire de la forme (indicateur de dégradation) principalement par l'intermédiaire d'un filtre de Kalman.
- Approches basées sur l'expérience : elles s'appuient sur des modèles fiabilistes ou des modèles stochastiques de la dégradation qui sont construits sur le retour d'expérience composé des temps de passage d'un état à un autre (temps de défaillance pour les modèles fiabilistes) ou d'avis d'experts. Ils sont principalement utilisés lorsqu'il est trop difficile d'élaborer un modèle physique et qu'aucun dispositif de suivi de l'état de dégradation n'est opérationnel (Byington *et al.*, 2002).

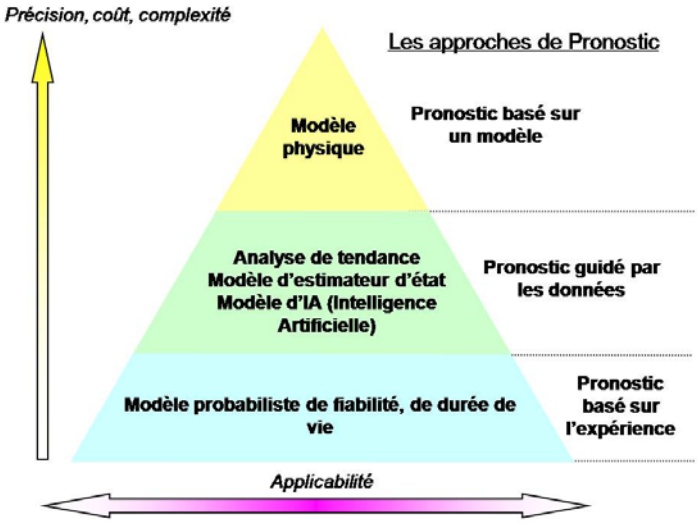


Figure 21. Représentation hiérarchique des approches de pronostic (Byington *et al.*, 2002; Muller, 2005)

Cette classification a été reprise et amendée par de nombreux travaux qui cherchent soit à diminuer le nombre de classes (dans ce cas les approches basées sur l'expérience sont vues comme guidées par les données de retour d'expérience) (Pecht et Jaai, 2010 ; Luo *et al.*, 2003 ; Lei *et al.*, 2007 ; Farrar et Lieven, 2007), soit à augmenter leur nombre en ajoutant une classe supplémentaire : une classe

d'approches basées sur des règles ou des cas (Dong et He, 2007) ou, plus simplement, par des approches hybrides (couplant deux approches provenant de deux classes distinctes) (Peng *et al.*, 2010).

D'autres travaux ont proposé de nouveaux critères pour classer les approches, ces critères pouvant être fonction du résultat attendu, des informations utilisées par le pronostic... Ainsi, Jardine (Jardine *et al.*, 2006) définit une classification basée sur le résultat attendu du pronostic. Ils distinguent les travaux cherchant à obtenir une RUL et ceux cherchant à obtenir la probabilité de défaillance à une date donnée. Toutefois, les auteurs font la constatation que la seconde classe ne contient que peu de papiers et découpent la première classe en trois sous-catégories (« statistical approaches », « artificial intelligent approaches » and « model-based approaches ») correspondant à la classification de Lebold et Byington.

Le critère de classification peut également concerner les besoins en connaissances et données du pronostic. Ainsi les auteurs de (Heng *et al.*, 2009) proposent d'utiliser la nature des entrées. Ils catégorisent les modèles basés sur des événements, les modèles basés sur l'état et les modèles intégrant ces deux approches. Les événements représentent principalement les passages dans un état donné (e.g. la défaillance) et la classe d'approches associées recense l'ensemble des modèles fiabilistes et stochastiques de la dégradation. Les pronostics basés sur l'état font l'objet d'une sous-classification : les pronostics basés sur les modèles physiques et les pronostics guidés par les données.

Ainsi, il est possible de montrer les correspondances entre ces trois classifications (figure 22). Cela met en évidence le fait que, malgré une volonté de diversifier les points de vue, le résultat reste principalement une vision commune basée sur les outils et techniques de pronostic.

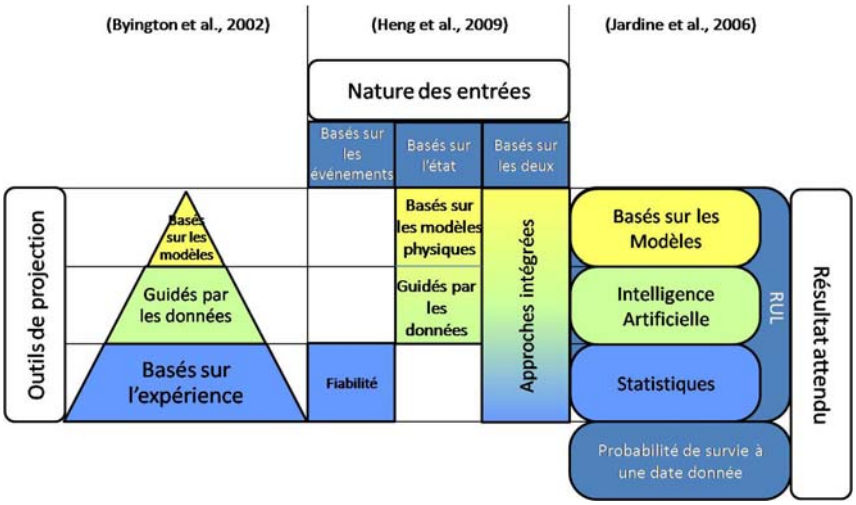


Figure 22. Correspondance entre les classifications de (Byington *et al.*, 2002; Heng *et al.*, 2009; Jardine *et al.*, 2006)

Cependant, Vasile a proposé une classification originale (figure 23) en utilisant comme critère le contenu des entrées du pronostic : données, informations et connaissances (Vasile, 2008). Dans ce cadre, les données représentent le contenu le plus simple, sans aucun sens propre si elles ne sont pas interprétées (e.g. 90°C), les informations sont des ensembles de données structurées dans un contexte incluant une signification (température actuelle d'un processeur : 90°C) et la connaissance

est la manipulation d'informations laissant percevoir une capacité d'action (impact de la surchauffe du processeur sur sa dégradation).

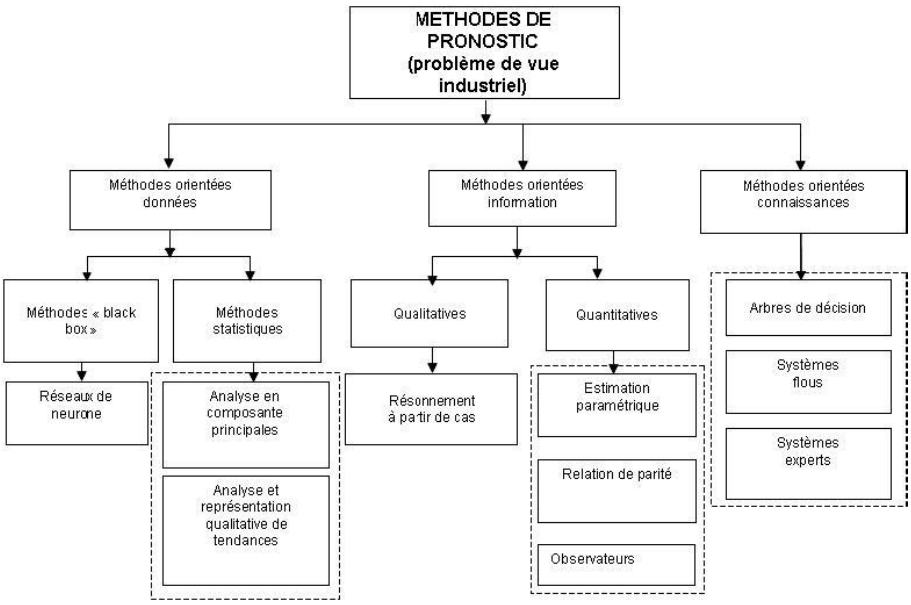


Figure 23. Classification de (Vasile, 2008)

Si l'ensemble des ces classifications montre une très grande diversité et l'importance accordée par la communauté à la recherche des outils de pronostic, il semble à l'heure actuelle difficile de différencier les approches autrement que par l'analyse du modèle lui-même (par l'étude de l'outil mathématique ou des flux d'informations et de connaissance utilisé) car la notion de performance de pronostic reste encore mal définie. Dans une optique de mieux maîtriser l'incertitude liée à ce processus, il y a néanmoins certains travaux qui ont abordé le problème en reliant la précision et la justesse des résultats de pronostic avec l'évolution réelle du système (Adeline *et al.*, 2008). Ces défauts sont intégrés sous forme d'incertitude (Provan, 2003) et nécessitent des métriques de mesure de performance comme présentées dans différents travaux (Kacprzynski *et al.*, 2004 ; Saxena *et al.*, 2009). El-Koujok (El-Koujok *et al.*, 2010) propose des modèles de projection cherchant par construction à maximiser la justesse. Dans un point de vue plus global, les auteurs de (Saxena *et al.*, 2008) définissent un état de l'art des métriques qu'ils classifient en trois catégories (figure 24) : les performances algorithmiques (liées à la projection et au calcul de RUL : justesse, robustesse, précision et qualité des trajectoires), les performances de puissance de calcul et les performances liées aux coûts et bénéfices. Ils aboutissent à la conclusion que les métriques concernant justesse, précision et coût/bénéfice sont les plus représentées. Leão (Leão *et al.*, 2008) expose une méthode reliant les aspects coûts/bénéfices à des résultats de projections comportant des erreurs de précision et de justesse.

Si ces perspectives de performances de pronostic sont essentielles afin de permettre au processus d'aide à la décision d'être réalisé dans les meilleures conditions, elles ne seront pas abordées directement par ce travail.

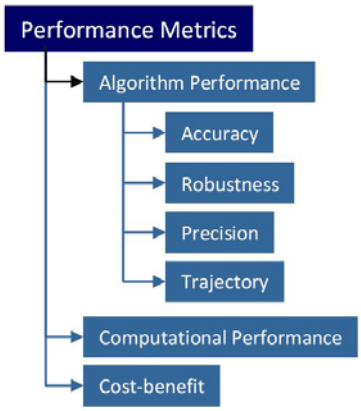


Figure 24. Classification des métriques de performance de pronostic (Saxena *et al.*, 2008)

II.3.2. Limites des classifications existantes et proposition

Les classifications recensées précédemment ont principalement pour objet de classer les différentes familles d'outils de pronostic. Cela montre les préoccupations de la communauté focalisées sur les difficultés à prédire des indicateurs dans le futur ou à guider le concepteur dans le choix d'un outil de pronostic. Néanmoins, ces travaux n'offrent pas de vision plus globale sur les réflexions menées au sein de cette communauté. Elles se limitent aux outils supportant le pronostic sans remettre celui-ci dans son contexte, à savoir un processus intégré au sein d'un système de maintenance prévisionnelle et alimentant un processus d'aide à la décision dynamique de maintenance en informations. Cet environnement permet de placer le pronostic dans une vision plus large : un système de maintenance intégré cherchant à maintenir en conditions opérationnelles un système principal.

Ainsi, dans une vue système, la description de cet environnement est capitale pour identifier les besoins et les attentes du pronostic. Cette étude peut être menée par l'observation des flux informationnels entrants et sortants et permet de proposer trois critères fondamentaux :

1. L'objectif de la maintenance. Le résultat du pronostic fourni à l'aide à la décision est représentatif de l'objectif de la maintenance qui définit les besoins de l'aide à la décision.

- L'objectif est d'assurer la fiabilité du système. Le résultat attendu du pronostic est alors la date de la prochaine défaillance ou une probabilité de défaillance. L'objectif est donc bien d'établir les états de santé futurs d'un composant ou d'un système.
- L'objectif est d'optimiser les coûts de maintenance. Il est donc nécessaire d'évaluer les performances futures du SP. Cela demande d'intégrer la dégradation (et non uniquement les défaillances des composants) du système sur ses performances.
- L'objectif est de rationaliser le LCC. On peut considérer que les résultats attendus du pronostic sont les mêmes que précédemment. En effet, la nuance entre ces deux stratégies intervient principalement dans les critères sélectionnés pour décider et au sein desquels les performances du SP doivent être intégrées pour prendre en compte l'ensemble des performances du SP et du SM.

2. La modélisation du contexte courant et futur. La connaissance de l'état courant du système et de son environnement futur doit permettre de mieux adapter le modèle de pronostic au comportement actuel et futur du système. Cette connaissance est issue d'informations réparties en trois catégories : les informations permettant d'obtenir l'état courant et passé proche de l'équipement considéré

(données courantes provenant de la surveillance et résultat de diagnostic), les informations permettant de définir le scénario futur d'utilisation du système et enfin les informations fournissant le scénario futur de maintenance.

3. Les sources de la connaissance. Le traitement des informations fournies au pronostic est réalisé selon la connaissance disponible sur l'évolution dysfonctionnelle du système, intégrée au sein du modèle de pronostic. Cette connaissance est essentielle et utilisée lors de phases de création ou de réajustement de modèles et provient de deux sources : l'expertise et les données d'apprentissage.

- L'expertise porte sur deux types de connaissance distincts : la connaissance de lois physiques de la dégradation ou l'établissement d'un modèle mathématique empirique, et la connaissance sur le fonctionnement et les évolutions des indicateurs principaux de la dégradation, acquise par l'expert au cours de ses expériences et reformalisée par lui. Cette connaissance est représentative du comportement global du système mais se révèle être imprécise.
- Les données sont des ensembles de mesures qui caractérisent l'état du système et/ou ses sollicitations. On peut classer ces données en deux groupes : celles provenant d'équipements similaires, stockées au sein de bases de données (historiques) et les données courantes provenant directement du système *via* le système de surveillance. Les historiques constituent un retour d'expérience (REX), utilisé dans des phases hors-ligne pour créer/ajuster les modèles en phase de conception ou dans le cadre d'une amélioration continue du modèle. La connaissance extraite est souvent précise mais ne contient que les comportements relatifs aux dégradations observées. Les données de surveillance courantes permettent d'ajuster le pronostic en-ligne à la situation courante (après un diagnostic) par le choix des modèles à utiliser, puis par leur initialisation sur la situation courante.

Ce dernier critère est très proche des critères utilisés dans les classifications proposées dans la littérature, il est possible de définir une relation entre les modèles de pronostic et l'origine de la connaissance.

Sur la base de ces trois critères fondamentaux, nous proposons d'établir une nouvelle classification. Les choix des critères et de leurs modalités a pour objectif de présenter une description originale de la communauté mettant en évidence des verrous scientifiques. Cette proposition n'est, en revanche, pas encore validée et demandera d'être confrontée au reste de la communauté pour être approuvée. Ces critères et les modalités choisis sont :

- Pour quel objectif seront réalisées les actions de maintenance :
    - Fiabilité de niveau composant,
    - Fiabilité du système,
    - Performance du SP,
- Utilise-t-on les informations représentant le contexte opérationnel futur :
    - aucune,
    - conditions opérationnelles et/ou environnementales futures,
    - scénario de maintenance futur.
- La connaissance utilisée est issue:
    - des lois de la physique ou d'un modèle mathématique empirique de la physique,
    - de données courantes,

- des lois de la physique ou d'un modèle mathématique empirique de la physique et de données courantes,
- d'un REX (historique et/ou expertise) et de données courantes.

Cette classification (figure 25) n'a pas pour objet d'être exhaustive vis-à-vis des travaux de la communauté et présente l'analyse effectuée sur un ensemble de 54 articles (voir annexe 1).

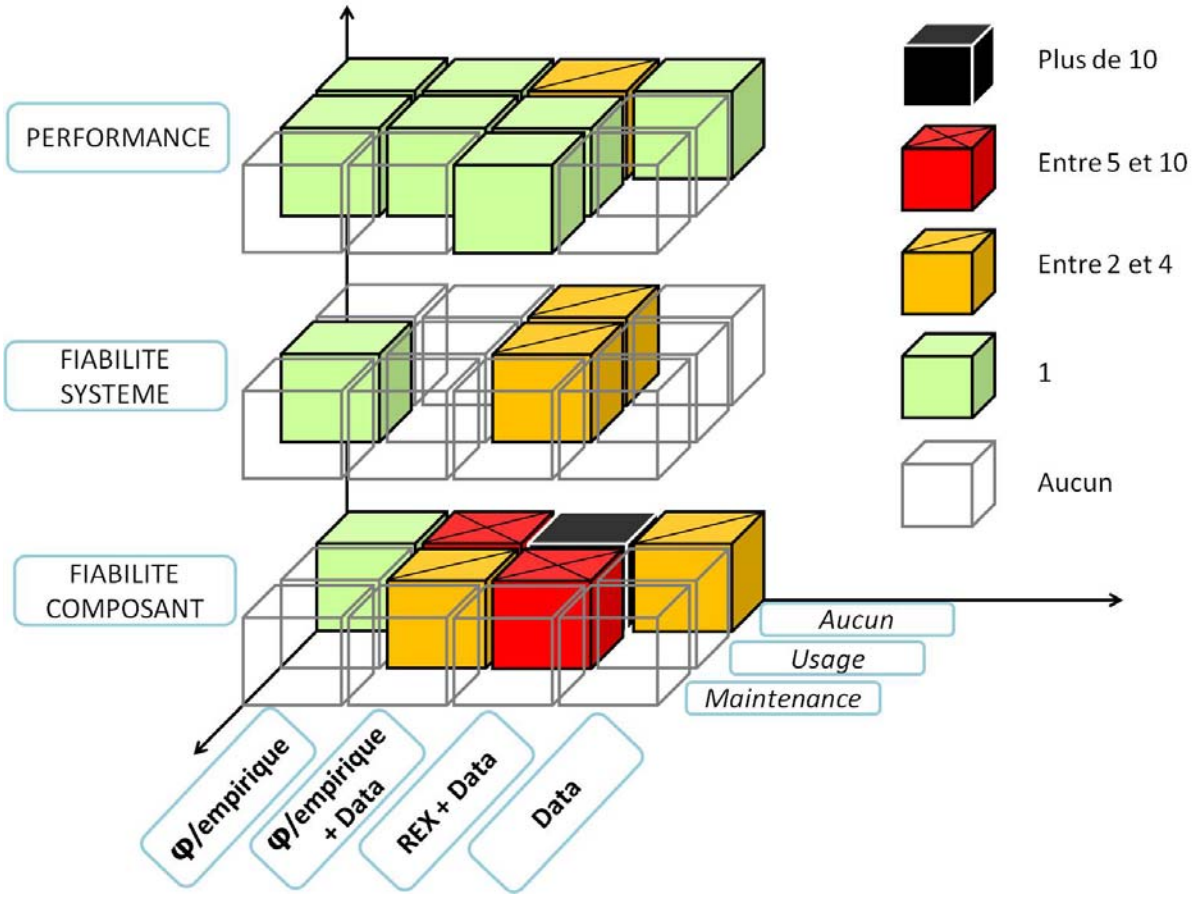


Figure 25. Classification des travaux relatifs au pronostic[41]

Pour chaque critère, les travaux majoritairement représentés concernent les modalités « fiabilité composant », « Aucun » et « REX + Data ». La catégorie la plus représentée est leur intersection, contenant à elle seule environ 43% (23 papiers) de l'échantillon.

Au niveau du premier critère (objectif de la maintenance), on observe qu'une majorité de travaux est orientée composant et défaillance. Ce constat est également réalisé par (Lee *et al.*, 2006) ou encore (Saxena *et al.*, 2008). Les deux autres catégories représentent deux vues du niveau système : une vue défaillance et une vue dégradation de la performance. La première vue concerne une vision multi-niveaux (Système/Sous-système/Composant : S/SS/C) mais ne s'intéresse qu'à la défaillance sans considérer les pertes de performances relatives aux dégradations. Ces travaux reposent sur un ensemble de pronostics permettant d'obtenir la date de la défaillance future de chaque composant et les propagent à travers l'architecture organique (basé par exemple sur la fonction de structure (Peysson, 2009)) ou l'architecture fonctionnelle (basé par exemple sur un arbre de défaillance (Ribot,

[41] La lettre ϕ représente les lois de la physique

2009)) afin d'obtenir la date de défaillance du système. Comme on peut le constater sur la figure 25, la deuxième vue suscite un plus grand intérêt de la part de la communauté que la première. Le pronostic de performance de niveau système supporte une décision de maintenance pour garantir un objectif de performance. Cependant, à l'exception de (Biswas *et al.*, 2007; Muller, 2005), les travaux dans cette perspective ne propagent pas de comportement dysfonctionnel issu du niveau composant, mais traitent directement les comportements de niveau système.

La seconde dimension (contexte opérationnel futur) montre que, dans la très grande majorité des cas, le contexte opérationnel futur n'est pas pris en compte dans les travaux. Ceci peut être dû à la difficulté d'intégrer ce contexte au sein du modèle de pronostic. Ces travaux compensent ce manque en faisant l'hypothèse que le contexte opérationnel moyen appliqué au système dans le passé est représentatif du contexte futur. Néanmoins, quelques propositions considèrent l'usage futur en proposant une solution au cas par cas en fonction du modèle de pronostic alors qu'un seul travail intègre des opérations de maintenance (dans ce cas supposées parfaites) (Muller, 2005). Ce manque de prise en compte de la maintenance provient de la difficulté à modéliser l'impact d'une action de maintenance, et notamment des actions de maintenance imparfaites. Les travaux relatifs à cette problématique se concentrent sur l'impact des actions de maintenance sur le taux de défaillance, e.g. (Doyen et Gaudoin, 2004), et ne considèrent pas l'impact sur la dégradation des composants ou les performances du système (Cocheteux *et al.*, 2010).

Enfin, pour le dernier critère (source de la connaissance) on constate le besoin de la majorité des travaux d'utiliser une connaissance issue du passé (sous forme de lois de la physique, d'expertises ou de banques de données) pour en extraire des comportements probables et représentatifs, et de confronter le comportement réel observé à l'aide des données courantes à cette connaissance. Il est naturel que la catégorie « des lois physique/modèle empirique + données courantes » soit moins importante quantitativement que la catégorie représentant les modèles construits sur la connaissance issue d'un « REX + données courantes » car ces modèles sont plus rares et plus coûteux à obtenir (Byington *et al.*, 2002). Les deux autres catégories sont moins représentées. L'utilisation exclusive de données courantes pose l'hypothèse que le passé proche est représentatif du comportement futur, ce qui s'avère être une hypothèse trop forte dans de nombreux cas pratiques. Cependant, ces modèles peuvent permettre de pronostiquer des systèmes où aucune connaissance n'est disponible *a priori*. Enfin, la dernière catégorie suppose que les modèles de pronostic sont totalement paramétrés en amont de leur utilisation et sont représentatifs de tous les équipements similaires, ce qui limite leurs applications.

II.3.3. Synthèse sur l'état de l'art

Manque d'une vision multi-niveaux du système

L'étude de l'état de l'art a permis de faire émerger la séparation existante entre les travaux portant sur les dégradations des composants et les performances du système. Les premiers montrent une grande diversité de modèles adaptés à chaque composant en fonction de leur technologie et des connaissances disponibles sur leur dégradation. Ces travaux, centrés sur les composants, n'envisagent donc que le pronostic de caractéristiques représentatives de leur état (dégradation ou performance propre du composant). Nous qualifions ces travaux de **« pronostic de niveau composant ».**

Les travaux centrés sur les performances système considèrent celles-ci comme un symptôme de l'état de santé du système et ne prennent pas en compte les composants individuellement. De ce point de vue, cela revient à considérer le système comme un composant et à pronostiquer des caractéristiques représentatives des performances du système. Nous qualifions ces travaux de **« pronostic de niveau système »**. Ainsi, par analogie, nous définissons les pronostics prévoyant l'évolution des caractéristiques représentatives des performances d'un sous-système comme étant des **« pronostic de niveau sous-système ».**

Des travaux comme (Lee et al, 2006) préconisent justement de pronostiquer le système et ses performances mais ces travaux se limitent au pronostic de niveau système et très peu d'entre eux abordent la problématique du pronostic multi-niveaux. Celle-ci est d'autant plus importante que la décision de maintenance se justifie au niveau de la performance système et sa réalisation impacte le niveau des dégradations des composants, ces niveaux étant liés par la causalité dysfonctionnelle. Le modèle de pronostic recherché doit donc évaluer l'ensemble des performances et des dégradations d'un système multi-composants, c'est-à-dire effectuer un ensemble de pronostics de niveaux S/SS/C constituant ainsi ce que nous définissons par le terme **« pronostic système »**, pour faire la distinction avec le cas précédent.

Manque de prise en compte des scénarios futurs

Le pronostic doit intégrer l'ensemble des informations disponibles et pertinentes pour estimer au mieux l'évolution future du système. Il doit coller au plus près de la "réalité" en intégrant des mesures en ligne et pas uniquement hors ligne et statistiques de manière à tirer tous les bénéfices d'une maintenance prévisionnelle. Ainsi, un des aspects majeurs du pronostic est de prendre en compte les connaissances disponibles à l'instant du pronostic sur les scénarios connus de fonctionnement et d'interaction du système avec son environnement. Pour un système industriel, ces scénarios sont principalement représentés par :

- les conditions de fonctionnement, c'est-à-dire les prévisions d'utilisation du système au travers des variables opérationnelles futures,
- les conditions environnementales futures et les connaissances sur les facteurs influents de l'environnement (variables environnementales),
- le scénario de maintenance planifié ou envisagé car les opérations de maintenance effectuées influent sur l'état du système.

Manque de généricité

La majorité des travaux de la littérature proposent des approches liées à l'application ou au modèle de pronostic utilisé. Dès 2006, Lee (Lee *et al.*, 2006) constate que "*Most of the developed prognostics approaches are application or equipment specific. A generic and scalable prognostic methodology or toolbox does not exist.*" Pour (Saxena *et al.*, 2008) les travaux sont orientés vers une application spécifique. Ce manque de généricité est un frein au développement du pronostic dans le milieu industriel. En effet, sa mise en œuvre nécessite encore à l'heure actuelle pour chaque système une conception spécifique consommatrice de moyens financiers, matériels et humains importants et difficile à justifier. Un modèle générique doit permettre l'identification d'invariants de pronostic afin d'en déduire les besoins de modélisation pour aboutir à une méthodologie générique permettant de particulariser un processus sur une application particulière. Toutefois nous remarquons que certains travaux ont pris cette orientation : e.g. (Muller, 2005), (Peysson, 2009) ou (Djurdjanovic *et al.*, 2003).

II.3.4. Conclusion : mise en évidence des objectifs de la thèse

Face à ces constats, ce travail de thèse a pour objectif de contribuer au développement du pronostic pour les systèmes industriels par la proposition d'un modèle de pronostic et de son ingénierie répondant, même partiellement, aux insuffisances détaillées précédemment.

Ainsi, sur la base des objectifs et des insuffisances recensés précédemment, le pronostic considéré dans ce travail est un pronostic générique de type pronostic système, c'est-à-dire qu'il :

- doit prévoir l'ensemble des évolutions futures des performances et des dégradations du système et
- donner l'ensemble des durées de vie résiduelles calculables (du système, de ses sous-systèmes et de ses composants) pour les modes de défaillances détectés et induits.

Ces objectifs sont réalisés à partir de :

- la connaissance sur le système (structure, composition, technologie…)
- et d'informations
  - passées (historique des modes de fonctionnement passés),
  - présentes (état courant),
  - futures (scénario d'utilisation et de maintenance).

III. Formalisation générique du processus « Pronostiquer »

Nous proposons tout d'abord de définir le contexte du pronostic par un modèle générique recensant l'ensemble des parties prenantes et leurs interactions ainsi que les fonctions élémentaires nécessaires à l'obtention d'un résultat. Cette formalisation s'inscrit dans une démarche d'ingénierie système recensant l'ensemble des parties prenantes de l'environnement et de clarifier les informations échangées et les activités à réaliser. Dans la continuité des travaux d'A. Muller sur le SIMP, les travaux présentés ci-après sont basés sur des travaux publiés dans (Cocheteux *et al.*, 2007) puis étendus dans (Voisin *et al.*, 2010). Les éléments présentés dans ces deux modèles permettent de faire émerger les concepts invariants des pronostics.

Cette formalisation situe le processus « Pronostiquer» au sein du SIMP et propose une description des flux d'entrées/sorties (E/S) afin d'identifier la transformation des informations que le pronostic doit réaliser. Puis, la décomposition en sous-processus permet de détailler les processus d'obtention d'un résultat de pronostic, en accord avec les propositions normatives d'intégration préconisées par l'IEC 62264. **Ces modèles permettent de proposer une vue statique des flux et des activités générique du processus de pronostic mais ne modélisent pas de comportement dynamique décrivant les traitements réalisés par les activités.** Préalablement, la méthode de modélisation choisie est présentée dans le paragraphe suivant.

III.1. La démarche de formalisation choisie

La démarche de formalisation adoptée ici est une approche processus supportée par l'outil MEGA[42]. L'approche processus utilisée est celle préconisée dans la norme qualité (ISO 9000:2000) qui propose une méthode de décomposition des processus des systèmes de management de la qualité. Dans cette représentation, les flux entrants sont transformés par le processus en un ou plusieurs flux de

[42] http://www.mega.com

sortie. Cette méthode permet de garantir l'obtention d'un résultat cohérent respectant un cadre de modélisation reconnu. La démarche définit les sous-processus du pronostic et leurs flux d'E/S, ce qui segmente le domaine d'étude et donc le développement du pronostic en développement de plusieurs sous-processus clairement identifiés et modélisés.

De plus, dans un objectif de préciser l'ensemble des concepts invariants, nous couplons l'approche processus avec la typologie des flux présentée dans (Mayer, 1995), issue des principes de la systémique, qui propose une classification des flux en quatre classes :

- DF (Devoir Faire) : c'est un flux porteur des objets finalisant ou finalisés du Système de nature informationnelle, matérielle ou énergétique.
- PF (Pouvoir Faire) : c'est un flux porteur des objets ressources du Système. Il est de nature matérielle, énergétique, humaine ou logicielle.
- SF (Savoir Faire) : c'est un flux porteur des objets informant le Système. Ce sont des informations transactionnelles.
- VF (Vouloir Faire) : c'est un flux porteur des objets stimulant un événement sur le système. Ce sont des informations événementielles.

Cette typologie permet de caractériser des flux entrant ou sortant d'un processus considéré afin de préciser et de mettre en évidence le rôle de ces flux vis-à-vis des besoins des traitements supportés par le processus.

III.2. L'environnement du processus « Pronostiquer »

Le sur-système du processus de pronostic, composé d'un ensemble de processus internes aux système de maintenance prévisionnelle et de processus externes provenant de différents systèmes de l'entreprise, constitue son environnement. L'étude bibliographique des systèmes de maintenance prévisionnelle (voir chapitre 1) a permis de faire émerger un ensemble d'activités réparties de façons différentes sur les processus supports. La figure 26 met en évidence les correspondances et les différences des rôles et objectifs des processus internes des travaux suivants :

- les processus définis par (Levrat *et al.*, 2008),
- OSA-CBM (Lebold *et al.*, 2001),
- WatchDog™ (Djurdjanovic *et al.*, 2003) dont le processus de décision est réalisé en dehors du composant WatchDog™,
- PEDS (Byington *et al.*, 2002),
- SIMP (Muller, 2005) pour lequel, sur la base de la définition du groupe de travail S3 (Sûreté, Surveillance, Supervision), les activités de surveillance et diagnostic sont réalisées au sein d'un processus unique de Surveillance[43].

[43] C'est le traitement de l'ensemble des informations concernant le fonctionnement d'un processus, issues des instruments de mesure et émises par l'opérateur, pour la détection, la localisation et le diagnostic de défaillances, et pour le suivi des conditions de fonctionnement liées au vieillissement des composantes du processus et au changement de l'environnement. (http://perso.ensem.inpl-nancy.fr/Didier.Maquin/S3/)

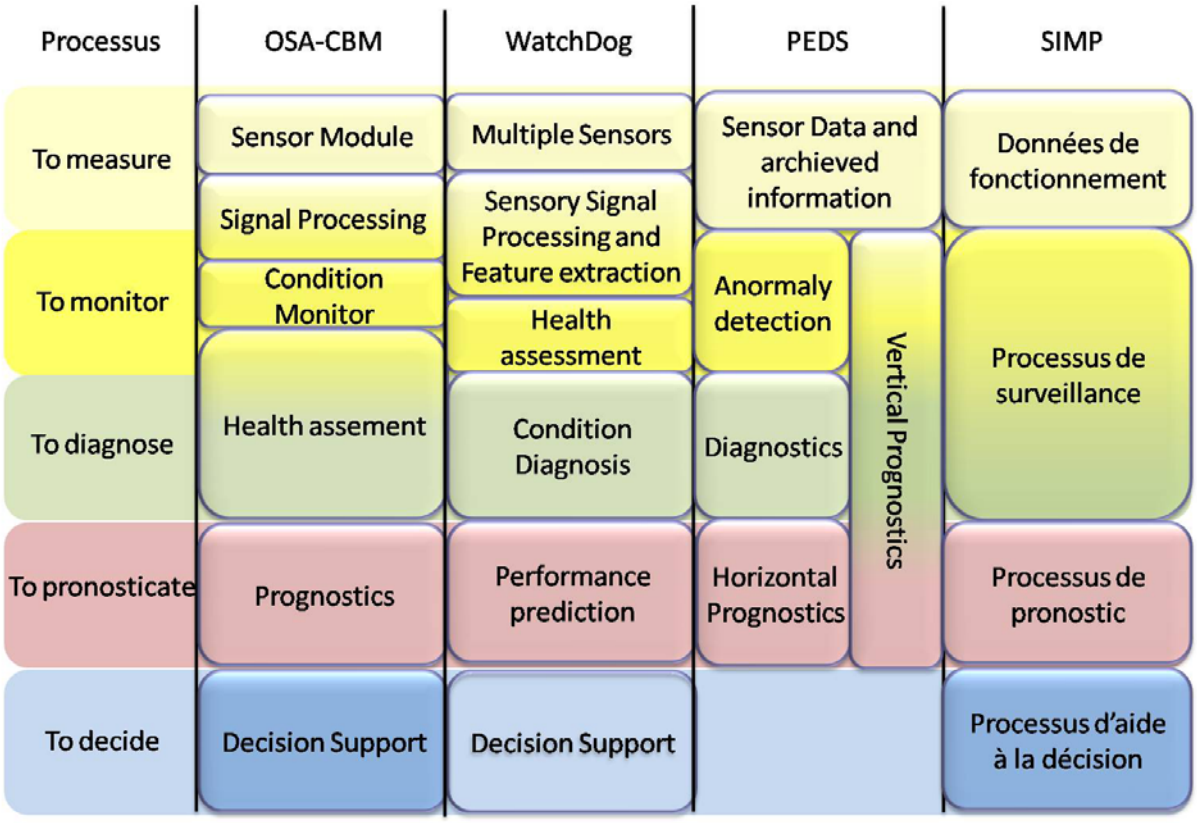


Figure 26. Correspondance entre les activités supportées par les différents processus des systèmes de maintenance prévisionnelle

Nos travaux sur le pronostic sont basés sur les résultats de (Muller, 2005). En ce sens la figure 27 présente une extension formalisée du modèle SIMP proposée par A. Muller pour modéliser le contexte du pronostic. Le SIMP est constitué des trois processus principaux de surveillance/diagnostic, de pronostic et d'aide à la décision. Sur la base des données fournies par le processus « Acquérir et pré-traiter », directement issues du système puis traitées (filtrées, segmentées…), le processus de surveillance et diagnostic détecte, localise et détermine les modes de dégradation/défaillance courants. La détection d'un nouveau mode de dégradation/défaillance déclenche l'exécution d'un pronostic qui intègre des connaissances liées aux scénarios futurs d'utilisation et de maintenance. Le résultat est transmis à l'aide à la décision. L'une des spécificités du SIMP est la boucle de retour entre ces deux derniers processus. Ce bouclage permet à l'aide à la décision d'évaluer différentes alternatives d'actions de maintenance et/ou de reconfiguration des scénarios d'utilisation futurs en pronostiquant l'évolution du système s'il subissait ces alternatives. Ainsi, l'aide à la décision est à la fois un processus aval et amont du pronostic et permet de déclencher le pronostic par d'autres événements que ceux provenant du diagnostic.

Les informations hors SIMP sont produites par des processus situés à différents niveaux de modélisation de l'entreprise. En accord avec la norme IEC 62264, le système de maintenance doit être intégré au système d'information de l'entreprise afin de lui permettre d'échanger les informations nécessaires. Au niveau système/process (opérationnel), on retrouve le processus « Acquérir et pré-traiter » et aux niveaux tactique et opérationnel, les processus « Gérer l'utilisation » et « Gérer la maintenance » qui sont supportés par des outils de type MES et GMAO. Enfin le processus « Gérer l'entreprise » se situe au niveau stratégique (ERP).

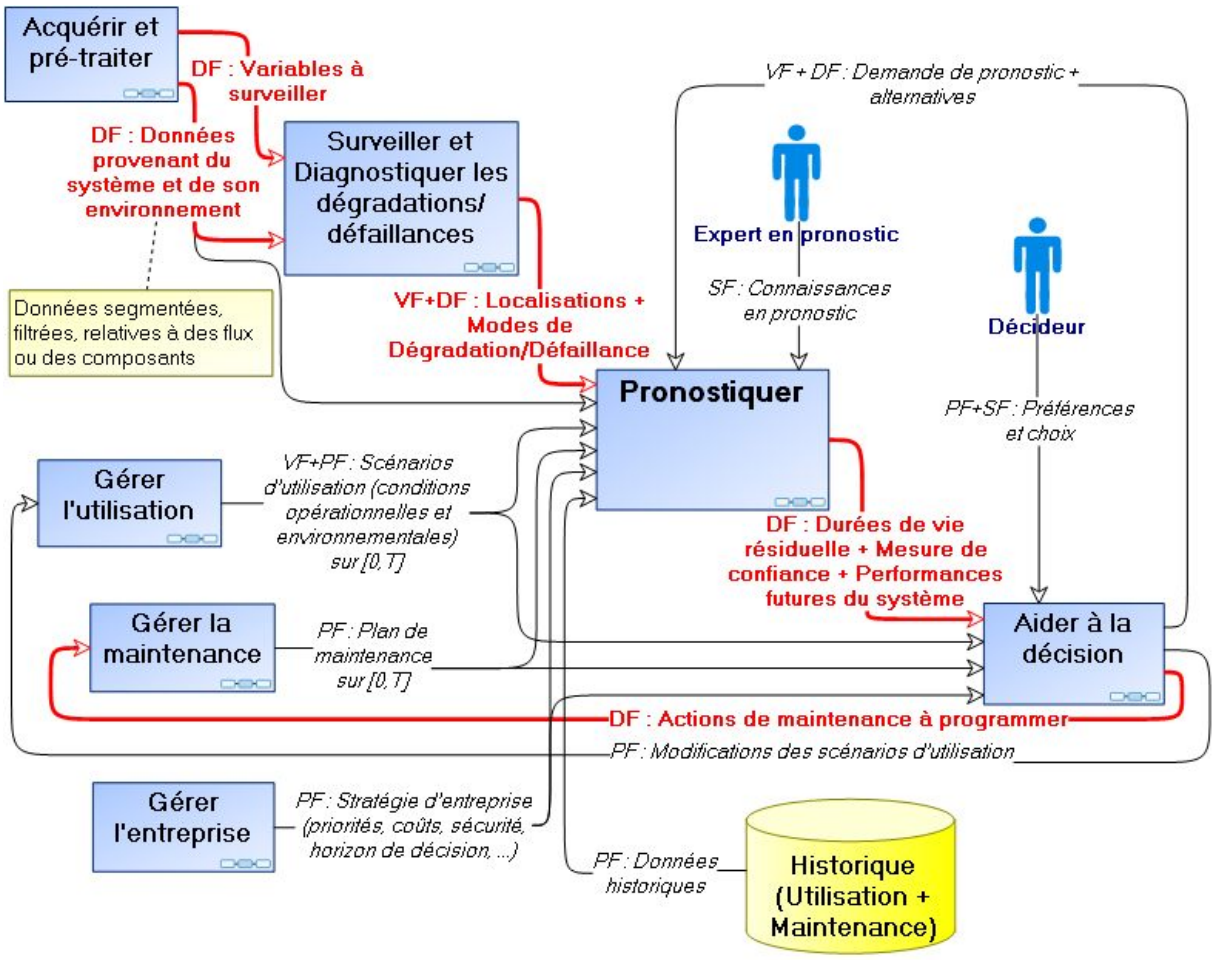


Figure 27. Environnement de « pronostiquer »

III.2.1. La finalité de « Pronostiquer »

D'après la norme ISO 13381-1, la finalité du processus de pronostic est de fournir un ensemble de durées de vie résiduelle (RULs). Ces RULs sont de deux types : les RULs composants en lien avec la dégradation des composants du système et les RULs fonctionnelles en lien avec le niveau de réalisation de la fonction supportée par le composant. Ces deux notions sont précisées par la suite. La détermination des RULs est réalisée sur une fenêtre temporelle [0,T] (0 est l'instant de référence du pronostic et T est le temps définissant l'horizon de pronostic). En supplément des RULs, le processus d'aide à la décision a besoin de l'ensemble des évolutions futures des performances de niveaux S/SS/C (Système/Sous-systèmes/Composants). En effet la connaissance des RULs ne permet pas à l'aide à la décision de travailler sur des critères de type qualité, coût, sécurité… car les RULs ne contiennent intrinsèquement que les informations sur la défaillance contrairement aux évolutions des performances qui portent les informations relatives à la dégradation. Ces informations sont nécessaires afin de permettre au processus d'aide à la décision d'évaluer les alternatives de maintenance en fonction de leurs impacts sur les performances.

Enfin le pronostic doit fournir un niveau de confiance associé à chaque RUL fonctionnelle et composant (ISO, 2004). D'après la norme ISO 13381-1 (ISO, 2004) : *« Un niveau de confiance est un*

chiffre (pourcentage) indiquant le degré de certitude que le diagnostic/pronostic est correct. Ce chiffre représente essentiellement l'effet cumulé des sources d'erreur sur la certitude finale ou la confiance dans l'exactitude du résultat ». Cette définition paraît restrictive puisque le plus souvent la confiance est représentée soit par un intervalle de confiance de niveau α, soit par une distribution de probabilité sur la variable RUL.

RUL composants : résultat du pronostic de la dégradation

D'un point de vue composant, une RUL est définie comme le temps restant avant la défaillance. La présence simultanée de plusieurs modes de dégradation/défaillance sur le composant conduit à fournir une RUL pour chaque mode de dégradation/défaillance. En effet, pour l'aide à la décision, la connaissance des RULs pour tous les modes de défaillance/dégradation permet de proposer des tâches de maintenance en groupant éventuellement les interventions dans le cadre d'une maintenance opportune (Thomas, 2009). Les modes de dégradation/défaillance sont de deux types: les modes avérés, i.e. les modes existants à l'instant initial du pronostic qui ont été révélés par le diagnostic, et les modes potentiels induits dont le pronostic prévoit l'apparition potentielle et l'évolution. Les modes avérés sont localisés uniquement sur les composants dégradés de façon avérée, et les modes potentiels sont localisés soit sur des composants dégradés soit sur d'autres composants non encore dégradés à l'instant t=0.
Pour l'ensemble des composants du système et des modes de dégradation/défaillance, la sortie du processus de pronostic doit comprendre tous les RULs associées à chacun d'eux (ce résultat n'étant pas la totalité de la sortie du pronostic) sous forme de liste par exemple, qui contiendrait ainsi l'union de trois ensembles de RUL :

$$\left\{\left\{RUL_{C_iMD_k}\right\} \cup \left\{RUL_{C_iMD_l}\right\} \cup \left\{RUL_{C_{ij}MD_m}\right\}\right\} \quad [1]$$

avec :

- RUL_{CMD} la durée de vie résiduelle du composant *C* soumis au mode de dégradation *MD*
- $C_i \in \breve{A}, \breve{A}$ l'ensemble des composants pour lesquels le diagnostic a détecté un mode de dégradation/défaillance, i.e. les composants en cours de dégradation,
- $C_j \in \breve{O}, \breve{O}$ l'ensemble des composants pour lesquels le diagnostic n'a pas détecté de mode de dégradation/défaillance mais pour lesquels le pronostic a projeté l'apparition de modes de dégradation/défaillance potentiels, i.e. composants non encore dégradés à l'instant t=0,
- $k \in \{1,\ldots,K_i\}$, K_i étant le nombre de modes de dégradation/défaillance avérés sur le composant i,
- $l \in \{1,\ldots,L_i\}$, L_i étant le nombre de modes de dégradation/défaillance potentiels sur le composant i,
- $m \in \{1,\ldots,M_j\}$, M_j étant le nombre de modes de dégradation/défaillance potentiels sur le composant j.

Cependant, on peut distinguer deux types de composants, les composants non réparables, i.e. on remplace le composant après l'occurrence d'une défaillance, et les composants réparables. Dans le premier cas uniquement, le résultat peut être simplifié : seule une RUL composant est nécessaire puisqu'il est changé à l'issue de ce temps, la RUL est donnée par la plus petite des RULs associées à celui-ci :

$$RUL_{Ci} = \begin{cases} \min\left(\left\{RUL_{Ci\,MDk}\right\} \cup \left\{RUL_{C\,j\,MDm}\right\}\right) & si\, C_i \in \breve{A} \\ \min\left(\left\{RUL_{Ci\,MDl}\right\}\right) & si\, C_i \in \breve{O} \end{cases} \quad [2]$$

RUL fonctionnelle : résultat du pronostic de la performance

D'un point de vue fonctionnel, la RUL est donc définie par rapport au niveau de réalisation de la fonction. Ce niveau de réalisation est représenté par les performances du support de la fonction. Pour un système mono-composant, le support ne peut être que le composant proprement dit et la fonction supportée par celui-ci représente la fonction de niveau système. Pour un système multi-composants, le support représente un composant (niveau élémentaire), un sous-système ou le système et est associé à des fonctions de niveaux composant, sous-système ou système. Une fonction pouvant être caractérisée à travers plusieurs performances relatives à la qualité du produit sortant, à la consommation énergétique… on peut donc calculer différentes RUL_{Perf}. Il est possible ensuite d'agréger les RULs pour obtenir une seule RUL fonctionnelle $RUL_{Fonctionnelle}$ en considérant que toutes les facettes de la performance représentatives de la fonction doivent être assurées. On peut écrire pour une fonction caractérisée par n performances :

$$RUL_{Fonctionndle} = \min\left(RUL_{Perf}\right) \; avec \; i \in \{1,\ldots,n\} \quad [3]$$

III.2.2. Les informations nécessaires au processus « Pronostiquer »

Pour atteindre sa finalité, le processus de pronostic doit interagir avec non seulement les processus du SIMP mais également avec d'autres parties prenantes du sur-système (figure 27). Les informations nécessaires au bon déroulement du pronostic concernent :

- *Localisations + modes de dégradation/défaillance (VF+DF)* : issues du processus « Surveiller et diagnostiquer les dégradations/défaillances », ces informations renseignent sur les modes de dégradation/défaillance courants aux niveaux composant et fonctionnel. Elles constituent un Vouloir Faire (VF) puisqu'en cas d'apparition d'un nouveau mode de dégradation/défaillance, un nouveau pronostic sera réalisé (modification de l'origine des temps et projection). Ce flux est également un Devoir Faire (DF) puisque la connaissance des modes de dégradation/défaillance permet au pronostic de sélectionner les modèles pertinents.
- *Données provenant du système et de son environnement (DF)* : fournies par le processus « Acquérir et pré-traiter », ces données sont prélevées sur le système. Elles portent, à l'instant considéré, l'état et les performances du système et des composants. Ces données filtrées sont segmentées pour ne contenir que les parties représentatives de l'état du système (par exemple les données mesurées lors d'un arrêt du système sont éliminées).
- *Stratégie d'entreprise (priorités, coûts, sécurité, horizon de décision…) (PF)* : provient du processus « Gérer l'entreprise ». Elle précise l'horizon de pronostic défini par la fenêtre temporelle [0,T]. L'horizon dépend des choix stratégiques de l'entreprise, ainsi la possession d'un stock de pièces de rechange ou l'externalisation des interventions réduisent l'horizon de décision de maintenance et de pronostic. L'instant courant est pris comme instant de référence et comme origine (t=0) du pronostic. Puisqu'il existe un bouclage avec l'aide à la décision pour évaluer et comparer différentes alternatives d'actions de maintenance, il est nécessaire qu'elles soient pronostiquées à partir d'une référence commune. Ce flux est également à destination du

processus « Aider à la décision » pour lequel il précise les choix de performance (économique, écologique, sécuritaire…) sur lesquels la décision doit se fonder.

- *Données historiques (PF)* : ces données permettent d'établir et d'ajuster le processus «Pronostiquer » puisqu'elles contiennent une partie de la connaissance sur le système. Elles sont utilisées généralement pour identifier les paramètres des modèles du pronostic (courbes de dégradation, …) et pour les tester lors de phases hors-ligne (phase d'ingénierie ou dans un contexte d'amélioration continue du pronostic). Pour être exploitables, elles doivent contenir l'ensemble des informations décrites par les flux Pouvoir Faire et Devoir Faire (DF) du pronostic.
- *Connaissances en pronostic (SF)* : lors de la phase d'ingénierie, un expert apporte son savoir faire pour établir le processus « Pronostiquer ». Ce Savoir Faire (SF) est composé par : le choix des modèles propres à chaque mode de défaillance/dégradation de chaque composant, l'identification des paramètres de chacun des modèles, la coordination de ces modèles lors de modes de dégradation/défaillance multiples, la modélisation de l'impact de ces modes de dégradation/défaillance sur les performances de niveaux S/SS/C, la modélisation de l'impact des actions de maintenance et de changement de conditions opérationnelles…

Le pronostic a également besoin de connaître le scénario futur d'utilisation et de maintenance sur l'horizon de pronostic [0,T]. Ce scénario se construit à partir de:

- *Scénarios d'utilisation (conditions opérationnelles et environnementales) sur [0,T] (VF+PF)* : provenant du processus « Gérer l'utilisation », ces informations décrivent les missions futures imposées au système. Elles sont composées d'un ordonnancement d'activités associées à une durée. Ces activités sont traduites sous forme de variables opérationnelles représentatives de la commande qui sera appliquée au système et sous forme de variables environnementales représentatives des conditions dans lesquelles le système va évoluer. Ce flux de type Pouvoir Faire permet de prendre en compte l'impact de l'utilisation et tout résultat de pronostic n'a de sens que vis-à-vis du scénario considéré. Ainsi toute modification du scénario a pour effet de recommencer un calcul de pronostic faisant également de ce flux un Vouloir Faire.
- *Plan de maintenance sur [0, T] (PF)* : délivré par le processus « Gérer la maintenance », il s'agit des opérations de maintenance initialement prévues qui proviennent de stratégies systématiques et que l'aide à la décision doit ajuster par l'ajout, la suppression et le ré-ordonnancement d'actions. Pour le pronostic, cette connaissance permet de prendre en compte les améliorations apportées par les opérations de maintenance sur l'état du système.
- *Demande de pronostic et Alternatives (VF+PF)* : cette entrée constitue le bouclage avec le processus « Aider à la décision » et fournit au pronostic l'ensemble des alternatives à évaluer. Pour prévenir la défaillance, chacune de ces alternatives modifie le contexte opérationnel futur par l'ajout, la suppression, la modification d'actions de maintenance ou la reconfiguration du scénario d'utilisation. Le pronostic les évalue en fournissant de nouveaux résultats à l'aide à la décision. Ainsi, les informations provenant du processus « Aider à la décision » sont de deux types, un Vouloir Faire représenté par une demande de pronostic de la part du décideur et un Pouvoir Faire constitué par les alternatives. Cette demande de pronostic peut également provenir d'une demande du décideur *via* le processus d'aide à la décision.

La comparaison entre les flux entrants et sortants permet de mettre en avant les transformations, importantes, réalisées par le processus de pronostic. Elles ne peuvent être effectuées que par un

ensemble de sous-processus modifiant tour à tour les flux entrants pour obtenir le résultat escompté.

III.3. Décomposition de « Pronostiquer » en sous-processus

À partir du processus de pronostic identifié dans son sur-système (principe de la boîte noire), la phase suivante consiste à clarifier les activités génériques décomposant ce processus (principe de la boîte blanche). En effet, l'étude des définitions du pronostic a permis de mettre en avant un ensemble d'activités à travers les différents résultats attendus. Ainsi, les obtentions d'état futur et de RUL sont issues d'activités diverses reposant sur des processus sous-jacents. L'état étant défini par un ensemble d'indicateurs, son pronostic nécessite de les projeter dans le futur. L'obtention d'une RUL demande une opération supplémentaire afin de faire passer la défaillance de l'espace d'état dans l'espace de temps. Ainsi on en déduit deux sous-processus de « Pronostiquer » : « Projeter dans le futur » et « Calculer les durées de vie résiduelle ». L'utilisation en ligne du pronostic demande un processus supplémentaire « Initialiser l'état et les performances » afin d'utiliser les informations sur l'état courant permettant de tirer profit de toutes les connaissances disponibles. La mise en œuvre de ces trois sous-processus a besoin d'être contrôlée par un même processus « Piloter le pronostic ». Ainsi, le processus de pronostic se décompose en quatre sous-processus génériques présentés figure 28.

L'occurrence d'un nouveau mode de dégradation/défaillance diagnostiqué ou d'une demande de pronostic provenant de l'aide à la décision déclenche un pronostic. Le résultat du diagnostic permet au pilotage de déterminer l'ensemble des indicateurs à considérer vis-à-vis de la situation courante, c'est-à-dire les indicateurs liés aux modes en cours et les indicateurs liés aux performances impactées par ces modes. Il fournit ensuite un ensemble structuré des modèles associés à chaque indicateur au processus d'initialisation qui les initialise à l'aide des informations sur le système courant. Ces modèles peuvent ensuite être fournis au processus de projection qui permet d'obtenir les évolutions futures des indicateurs en intégrant les scénarios futurs d'usage et de maintenance. Enfin ces projections sont transmises au dernier processus qui calcule les RULs à l'aide des modèles de seuils transmis par le pilotage. Celui-ci coordonne donc les trois autres processus à travers ses flux de demande permettant de les exécuter de façon séquentielle.

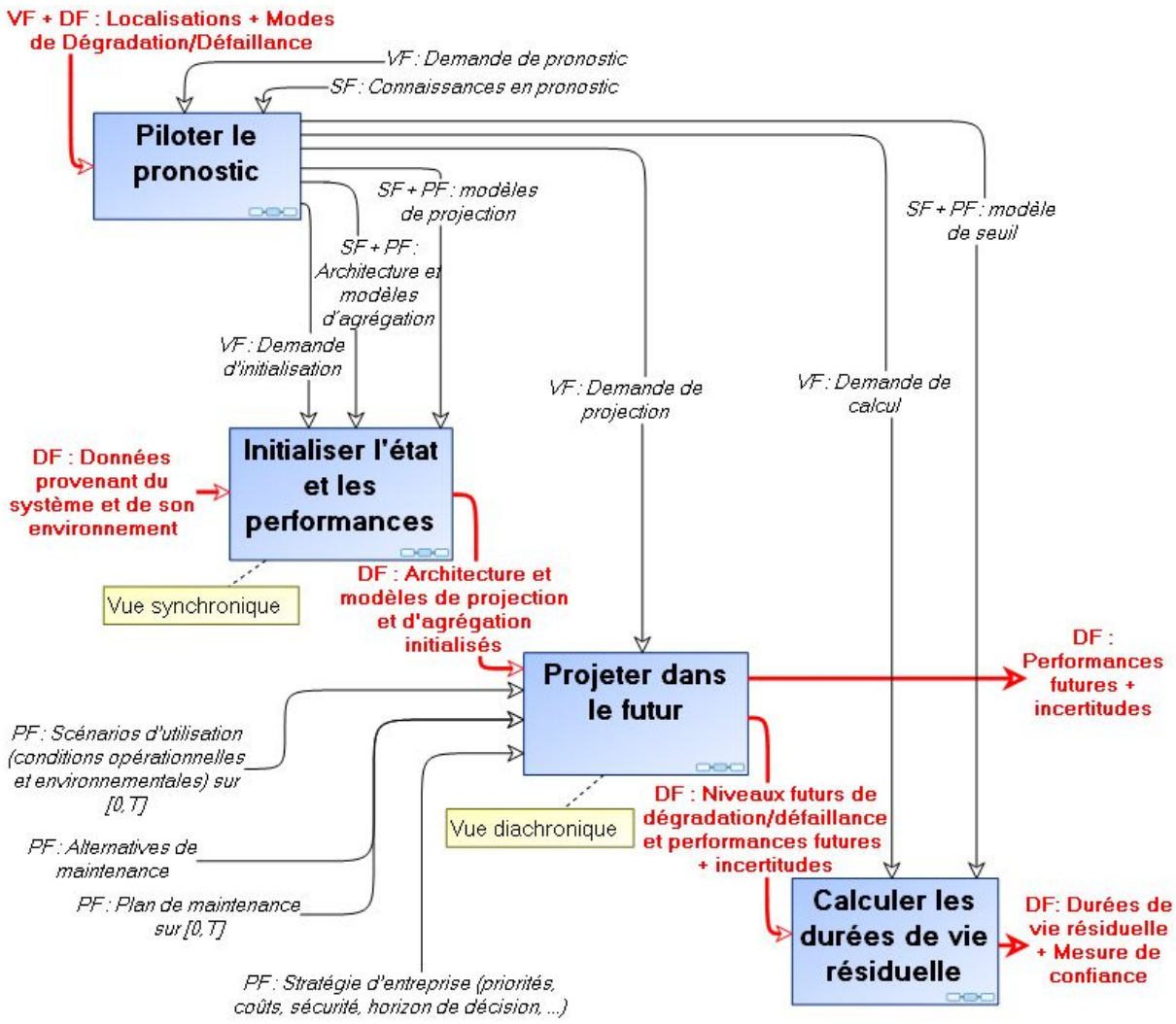


Figure 28. Décomposition du processus « Pronostiquer »

III.3.1. Piloter le pronostic

Le sous-processus « Piloter le pronostic » a pour finalité de contrôler l'activité des trois autres sous-processus. Il doit pour cela, d'une part, coordonner l'activité des autres sous-processus et, d'autre part, leur fournir les modèles appropriés à la situation courante (Savoir Faire), i.e. les modes de dégradation/défaillance courants et leur localisation (résultat du processus de diagnostic).

Ainsi, « Piloter le pronostic » possède 2 types de sorties :

- Des demandes d'actions des autres sous-processus,
- Les modèles nécessaires à leur activité. On distingue trois flux différents :
  - *Architecture et modèles d'agrégation (PF)* : ce flux est fourni au processus « Initialiser l'état et les performances » et est composé de deux éléments :
    1. L'architecture : Le processus de pilotage doit désigner l'ensemble des composants et fonctions de niveaux S/SS/C concernés par le pronostic en fonction des modes de dégradation/défaillance en cours donnés par le diagnostic. Avec la connaissance de la causalité dysfonctionnelle, c'est-à-dire les relations entre dégradations et pertes de performances, le processus de pilotage désigne l'ensemble des indicateurs de dégradation et de performances à projeter.

2. Les modèles d'agrégation : ces modèles (quand ils existent) représentent quantitativement les liens de causalité précédents. Ils permettent ainsi d'obtenir une performance (de niveau S/SS/C) en se basant sur les indicateurs de dégradation ou de performance de niveau inférieur. Ils ne projettent pas dans le futur mais calculent des performances au temps t sur la connaissance des indicateurs au même temps t. Nous sommes ici dans une vision synchronique.

- *Modèles de projection (SF+PF)* : fournis au processus « Initialiser l'état et les performances », les modèles de projection doivent répondre à deux points clés du processus de projection. Le premier concerne la modélisation de l'impact du scénario d'utilisation et des alternatives de maintenance sur les niveaux et les dynamiques des modes de dégradation/défaillance en cours, ou sur les performances. Le second point-clé porte sur la capacité à prévoir l'apparition de modes de dégradation/défaillance secondaires (potentiels) engendrés par l'évolution de modes avérés.
- *Modèles de seuil (SF+PF)* : fournis au processus « Calculer les durées de vie résiduelles», ils sont définis suivant le type de grandeur à laquelle ils sont associés, i.e. niveau de dégradation ou performance. Nous parlons de modèles de seuil car ils doivent tenir compte de l'incertitude que l'on peut avoir sur ce dernier comme par exemple la variabilité inter-composants. Ils peuvent, par exemple, se présenter sous la forme de distribution (et à ce titre sont des modèles) comme représentés sur la figure 29. Cette figure montre le résultat obtenu par le franchissement d'un indicateur projeté (qui ne contient pas d'incertitude) sous forme d'une distribution de RUL.

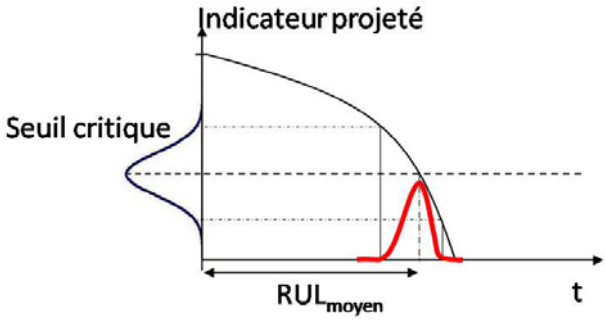


Figure 29. Modèle de seuil

Pour obtenir ces sorties, le processus de pilotage nécessite en entrée :

- *Localisations + modes de dégradation/défaillance (VF + PF)* : *cf* § III.2.2
- *Demande de pronostic (VF)* : ce flux est composé de deux flux en provenance de l'aide à la décision et de la gestion de l'utilisation. Cette demande permet de calculer de nouveaux résultats lors de toute modification du scénario futur d'utilisation ou lors de l'arrivée de nouvelles alternatives proposées par l'aide à la décision. Cette demande de pronostic ne doit déclencher que les sous-processus « Projeter dans le futur » et « Calculer les durées de vie résiduelle »,
- *Connaissances en pronostic (SF)* : *cf* § III.2.2

III.3.2. Initialiser l'état et les performances

La finalité du sous-processus « Initialiser l'état et les performances » est de fournir un point de départ au processus « Projeter dans le futur ». Il permet d'actualiser la situation courante du système et de ses composants avec les dernières données disponibles. Il fournit une vision synchronique du système et de ses composants. La sortie est constituée de l'ensemble des modèles ajustés à la situation courante :

- Les modèles de projection de la dégradation des composants pour chaque mode de dégradation/défaillance avéré,
- Pour chacune des performances de niveaux S/SS/C impactées par les modes de dégradation/défaillance diagnostiqués et dont on a le besoin de pronostiquer l'évolution :
    - soit par un modèle de projection,
    - soit par un modèle d'agrégation.

Pour atteindre cet objectif, le processus a besoin en entrée de :

- *Données provenant du système et de son environnement (DF)* : *cf* § III.2.2
- *Demande d'initialisation (PF)* : Elle est nécessaire dans deux situations : soit un nouveau mode de défaillance/dégradation est apparu, soit la dernière initialisation est périmée et l'aide à la décision fait une demande de pronostic,
- *Architecture et modèles d'agrégation (PF)* : *cf* § III.3.1
- *Modèles de projection (SF+PF)* : *cf* § III.3.1

III.3.3. Projeter dans le futur

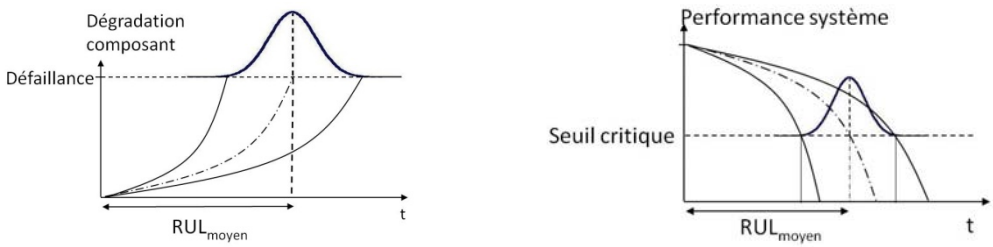
Le sous-processus *« Projeter dans le futur »* permet de déterminer l'évolution des dégradations/défaillances et des performances de niveaux S/SS/C afin d'avoir une vue diachronique (à travers le temps) du système. La projection tient compte de l'influence des conditions opérationnelles et environnementales, ainsi que de l'impact des différentes actions du plan de maintenance (scénario et alternatives). Les évolutions futures des performances constituent un résultat du processus de pronostic envoyé directement à l'aide à la décision. Elles sont également fournies au processus « Calculer les durées de vie résiduelle » en association avec les évolutions des niveaux de dégradations afin d'en obtenir les RULs.

La projection est réalisée à partir des informations suivantes :

- *Demande de projection (VF)* : cette demande est issue du processus « Piloter le pronostic » et déclenche une projection,
- *Architecture et modèles de projection et d'agrégation initialisés (DF)* : issus du sous-processus « Initialiser l'état et les performances », ces informations servent de point de départ de la projection,
- *Scénarios d'utilisation (conditions opérationnelles et environnementales) sur [0,T] (PF)* : *cf* § III.2.2
- *Plan de maintenance sur [0,T] (PF) : cf* § III.2.2
- *Alternatives de maintenance (PF)* : le scénario est complété par le processus « Aider à la décision » qui propose des alternatives sur [0,T] au plan de maintenance et au scénario d'utilisation prévu.

III.3.4. Calculer les durées de vie résiduelles

Ce dernier sous-processus permet de calculer les RULs, l'une des finalités du processus de pronostic. Une RUL est définie par la date, dans l'intervalle [0,T] à laquelle la valeur de la projection franchit un seuil. Suivant la valeur projetée le seuil n'est pas défini de la même manière. Il existe deux types de seuil, les seuils composants, qui correspondent à des défaillances des composants, et les seuils fonctionnels, qui correspondent à une perte de finalité (figure 30). Pour un composant, les seuils correspondent à l'occurrence de la panne du composant. Ces seuils sont utilisés sur les résultats de projection des indicateurs de dégradation des composants et permettent d'obtenir des RULs composants. Chaque composant est susceptible d'être affecté par plusieurs modes de dégradation/défaillance. Ainsi, pour un composant, connaissant le seuil pour chaque projection, il est possible de déterminer une RUL pour chaque mode de dégradation/défaillance.
De même au niveau fonctionnel, le seuil est défini par rapport à la finalité d'une fonction et correspond à la limite de performance pour laquelle on considère que la finalité n'est plus atteinte (seuil critique). Ceux-ci sont utilisés sur les projections des performances et permettent d'obtenir les RUL_{Perf}, chacune des performances se voyant attribuer une RUL. Ces RULs permettent de définir une RUL fonctionnelle ([3]), une durée après laquelle une des finalités du système ne sera plus respectée, nécessitant donc une action de maintenance.



Seuil composant Seuil fonctionnel

Figure 30. Seuils composants et système

Le processus de calcul des RULs nécessite trois types d'informations :

- *Demande de calcul (VF)* : cette demande, issue du sous-processus « Piloter le pronostic », déclenche un calcul de RUL,
- *Niveaux futurs de dégradation/défaillance et performances futures (DF)* : les informations concernent les niveaux de dégradation/défaillance futurs et les performances futures système et composants, provenant directement du processus de projection,
- *Modèles de seuil (SF+PF)* : *cf* § III.3.1.

III.4. Synthèse

Le modèle générique proposé présente l'ensemble des concepts et activités nécessaires au pronostic système défini précédemment. En se basant sur des concepts issus d'autres travaux et d'analyses menées, la vérification du modèle a été réalisée principalement par construction, basée sur les règles issues de l'approche processus. Ces règles permettent de garantir la cohérence du modèle par une méthodologie simple (entre autres typologie des flux). Un premier degré de vérification a donc été obtenu. En complément, sa validation nécessite une confrontation avec des systèmes réels. Ceci doit être réalisé par la mise en œuvre des modèles particuliers sur une application spécifique à travers une instanciation de l'ensemble de ces concepts.

Cette étape supplémentaire de modélisation doit être supportée par une ingénierie permettant de guider l'obtention d'un processus de pronostic :

- qui permet d'évaluer l'ensemble des performances et des dégradations d'un système multi-composants (vue traitement du pronostic)
- en intégrant le contexte opérationnel futur constitué de deux types d'informations : celles concernant l'usage (conditions opérationnelles et environnementales futures) et celles concernant la maintenance (vue données du pronostic).

La mise en œuvre d'une telle ingénierie nécessite de s'appuyer sur des modèles liés à chacun de ces deux points.

1) Evaluation de l'ensemble des performances et des dégradations d'un système multi-composant :

Ces évaluations reposent sur un ensemble de pronostics de niveaux S/SS/C permettant d'obtenir l'évolution future de l'ensemble des performances et dégradations. Or les pronostics de niveaux S/SS/C ne sont pas indépendants car les dégradations et les performances sont reliées à travers la causalité dysfonctionnelle. Ainsi le pronostic système contient des modèles de pronostic de niveaux S/SS/C et des modèles de relation dégradation/perte de performance, ces derniers utilisant les résultats des premiers. Ces modèles ont besoin d'être organisés au sein d'architectures définissant leurs relations. Pour cela, plusieurs verrous scientifiques nécessitent d'être levés :

- une architecture générique permettant de structurer les pronostics de niveaux S/SS/C et les modèles de relation dégradation/perte de performance,
- une méthodologie générique de modélisation de la relation dégradation/perte de performance,
- une méthode de sélection des modèles pour chaque pronostic de niveaux S/SS/C.

2) Intégration du contexte opérationnel futur

Les conditions opérationnelles et environnementales ont une influence continue sur la dégradation et plus spécifiquement sur sa dynamique d'évolution. Cette dernière est modélisée par le modèle de projection qui doit donc intégrer leurs impacts. Pour la prise en compte du scénario de maintenance futur, il est nécessaire de faire cohabiter des phénomènes continus (dégradation) avec des événements discrets (maintenance). L'impact d'une action de maintenance sur la dégradation des composants dépend de deux points : les caractéristiques de la dégradation modifiées par l'action de maintenance et de la qualité de sa réalisation. Le premier point dépend du type d'action décidée et représente les modifications apportées à la dégradation. Ces modifications sont de différentes natures : relatives (la modification dépend de l'état juste avant maintenance) ou absolues (la modification ramène dans un état connu) et ciblent soit le niveau de dégradation, soit la dynamique d'évolution, soit les deux. Par exemple, un remplacement remet à neuf (pas de dégradation), un graissage n'agit pas sur l'état de dégradation mais uniquement sur sa dynamique ou encore l'action de retendre une courroie permet de diminuer l'impact de la dégradation sur les performances mais la dynamique d'évolution de la dégradation s'en trouve augmentée.

L'impact d'une action de maintenance sur la dégradation doit également prendre en compte l'imperfection de la réalisation de l'action de maintenance (qualité de l'action). L'impact de l'action sur les dégradations et performances peut être modulé en fonction de la qualité de l'action. Ces deux

points amènent à considérer deux modèles : un premier modèle permettant de déterminer la qualité de l'action et un second modèle représentant l'impact d'une action sur un composant par l'altération des paramètres du modèle de projection à la date de réalisation. Cette altération dépend du résultat du premier modèle. Leur résultat doit pouvoir être intégré au sein du modèle de projection. Ainsi trois verrous scientifiques se dégagent de ces problématiques :

- Prise en compte au sein du modèle de projection des conditions opérationnelles et environnementales ainsi que de l'effet des actions de maintenance agissant sur la dynamique
- Prise en compte de l'effet des actions de maintenance agissant sur le niveau de dégradation
- Prise en compte de la qualité de l'action de maintenance modulant l'effet des actions de maintenance.

IV. Conclusion

De part sa relative jeunesse, le pronostic est encore un processus dont la finalité, les missions et performances ne sont pas encore totalement stabilisés. Afin de clarifier cette situation, une cartographie de la terminologie a tout d'abord été donnée. L'étude bibliographique menée a permis d'établir un historique de la communauté « pronostic » puis un l'état de l'art qui a fait ressortir une vue majoritairement centrée sur les modèles de projection. Afin d'établir une vision plus globale des travaux de la communauté, une nouvelle classification a donc été proposée en s'appuyant sur l'analyse contextuelle du pronostic synthétisée à travers trois axes représentatifs de:

- L'objectif de la stratégie de maintenance,
- La prise en compte du contexte opérationnel futur,
- La source de la connaissance.

Cette classification a permis de mettre en évidence certaines insuffisances dans l'état de l'art. Tout d'abord elle a confirmé le manque d'intérêt vis-à-vis d'approches considérant les performances système déjà constaté dans (Lee *et al.*, 2006 ; Saxena *et al.*, 2008). En effet, la grande majorité des travaux ne considère qu'un pronostic de niveaux S/SS/C sans intégrer l'ensemble des niveaux contenus dans un pronostic système. Seuls quelques travaux abordent une vision système multi-niveaux mais se cantonnent à la propagation de défaillances sans considérer les dégradations. Cette classification a également permis de faire ressortir les limitations vis-à-vis de la prise en compte des scénarios futurs d'utilisation et de maintenance et d'un manque de généricité.

Face à ce constat, un modèle générique du pronostic système a été proposé à travers une formalisation de son environnement, ce qui a permis d'exprimer l'objectif du pronostic système (évaluer l'ensemble des performances et des dégradations futures du système). Ensuite, afin de modéliser plus précisément le pronostic et d'en faire émerger des concepts génériques, une décomposition a été introduite décrivant les quatre sous-processus nécessaires à l'obtention d'un résultat de pronostic.

L'analyse de ces modèles a fait émerger plusieurs verrous scientifiques nécessaires à la mise en œuvre de pronostic multi-niveaux, comme la modélisation d'architectures structurant l'ensemble des modèles de projection et des modèles reliant les différents niveaux. D'autres verrous ont été identifiés pour l'intégration de l'impact des conditions d'utilisation et de la maintenance dans les modèles de projection. Afin de donner une première réponse aux verrous scientifiques liés au

pronostic système, le chapitre suivant expose la proposition d'architectures permettant de structurer les modèles de projection issus de pronostic de niveaux S/SS/C et les modèles d'agrégation permettant de lier les dégradations et les performances de niveaux S/SS/C. Les modèles de projections sont choisis au sein des propositions émanentes des travaux de la communauté « Pronostic » ce qui nécessite de déployer une procédure de choix de modèle. En revanche, la problématique d'intégration du scénario d'utilisation et de la maintenance ne fait pas l'objet d'un développement spécifique dans ce travail. Nous considérons par hypothèse la possibilité d'obtenir de tels modèles pour l'ensemble des applications.

Chapitre 3 : Formalisation du pronostic système : proposition et ingénierie d'architectures

I. Introduction

Ce chapitre a pour objet de présenter la contribution principale de notre travail. Il s'agit d'une modélisation du pronostic système, réalisée à travers la proposition d'architectures permettant d'organiser des modèles plus élémentaires (atomes). Ces modèles élémentaires doivent pouvoir évaluer l'évolution d'un indicateur soit par projection soit par agrégation d'autres indicateurs. Ces éléments peuvent ensuite être assemblés pour former un modèle de pronostic système qui fournit l'ensemble des évolutions des dégradations et performances. Pour cela deux types d'architectures sont proposés : une architecture dite cumulée contenant des modèles de projection d'indicateurs de dégradation et des modèles d'agrégation, et une architecture dite étagée contenant des modèles de projection d'indicateurs de dégradation et de performance de niveau S/SS/C.

Ces deux architectures ne satisfaisant pas totalement aux contraintes imposées, une architecture mixte est ensuite définie pour combler les propres inconvénients de chacune avec les avantages de l'autre. L'ingénierie associée à ces architectures doit permettre de sélectionner l'ensemble des indicateurs à pronostiquer puis de construire une architecture et d'associer aux indicateurs projetés leur modèle de projection. Pour les indicateurs calculés, une méthodologie de construction des modèles d'agrégation est également proposée.

Toutes ces propositions ont pour objectif d'être génériques vis-à-vis des applications industrielles. Ainsi, l'ensemble de ces modèles qui formalisent les différents aspects fonctionnel et dysfonctionnel doivent s'appuyer sur une représentation générique de la connaissance. C'est pourquoi la première partie de ce chapitre est consacrée à la présentation de la modélisation des systèmes utilisée. Les parties III et IV présentent ensuite la construction des modèles élémentaires et leur assemblage dans deux types d'architectures proposés. Enfin, la dernière partie décrit la méthodologie de construction du pronostic système notamment par le choix des indicateurs à considérer et des modèles à utiliser.

II. Les fondements du pronostic système

II.1. Modélisation des systèmes

II.1.1. Définition de la performance d'un système

En cohérence avec la définition donnée dans le chapitre 2, le pronostic doit évaluer les performances futures du système. À la différence de la performance globale présentée au chapitre 1 qui se rapporte à une vision de performance du système global (système principal et l'ensemble des systèmes contributeurs), les performances étudiées du système dans ce chapitre porte sur la capacité du système principal à remplir sa mission. Selon Sénéchal (Sénéchal, 2004), ce concept n'est pas monolithique mais il dépend du contexte. Dans le contexte de l'ingénierie des systèmes, les auteurs de (Shin *et al.*, 2009) proposent une revue des travaux définissant la performance. En synthèse, les auteurs relient la performance au niveau d'accomplissement de la fonction supportée par le système ou une partie de celui-ci (sous-système ou composant). Sénéchal (Sénéchal, 2004) se place dans le contexte des systèmes de production et propose une revue bibliographique des travaux sur leurs performances. Il considère que le résultat n'est pas l'unique objet pour l'évaluation de performance et que la prise en compte des moyens utilisés et de l'adéquation entre objectif et résultat sont aussi une nécessité. L'AFIS définit également les performances des processus d'un

système comme étant les réponses de ceux-ci vis-à-vis des niveaux d'exigences (AFIS, 2009). Ces niveaux d'exigence (temps de réaction, vitesse, débit, capacité, sûreté de fonctionnement…) caractérisés par des scénarios opérationnels permettent de décrire quantitativement la finalité du processus. Le niveau d'exigence représente la performance attendue et permet d'évaluer un processus à travers son efficacité et son efficience (figure 31) définies dans (Sénéchal, 2004) de la façon suivante :

- L'efficience permet d'associer les résultats obtenus avec les moyens mis à disposition.
- L'efficacité est la propriété évaluant l'adéquation entre résultats et objectifs.

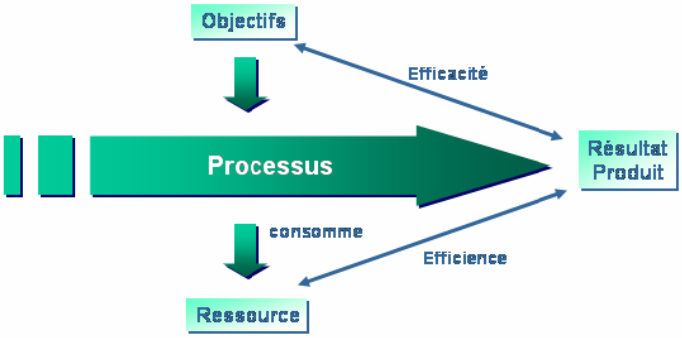


Figure 31. Performances d'un processus (AFIS, 2009)

Vis-à-vis du problème de modélisation traité dans ce chapitre, nous considérons que la performance est représentative de la réalisation de la finalité d'un processus. La ou les missions du système décrivent les produits ou les services attendus (AFIS, 2009) que le système doit fournir pour répondre à la finalité. La représentation des processus est une modélisation fonctionnelle (figure 32) dans laquelle le processus réalise la fonction « transformer les flux entrants en flux sortants », et est supportée par un équipement (système, sous-système ou composant) ou un acteur humain. Les flux de sortie étant les produits ou services attendus, ils décrivent donc l'adéquation entre la réponse du système et la finalité. Ainsi, nous relions les performances du processus à ces flux.

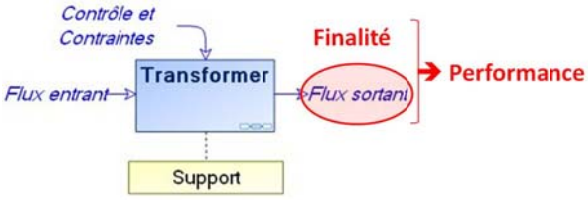


Figure 32. Modélisation générique d'un processus

Afin de concilier les points de vue sur la performance de (Shin *et al.*, 2009) et de (Sénéchal, 2004), nous définissons deux types de performances:

- Les « performances résultantes » obtenues sur les flux de sortie qui représentent les performances directement mesurables sur le système,
- Les « performances propres » représentatives de l'efficacité (évaluation des flux de sortie en fonction des flux de contrôle) et/ou de l'efficience (évaluation des flux de sortie en fonction des flux de ressource (e.g. flux d'énergie)). Selon les processus, les flux de ressource et de contrôle peuvent être portés :

- par un même flux entrant pouvant constituer le flux entrant principal (e.g. les processus supportés par le moteur et la courroie de la figure 33) ou être un flux secondaire (e.g. le processus supporté par le rouleau),
- par deux flux distincts dont l'un peut être associé au flux principal.

II.1.2. Modélisation récursive des systèmes

Afin de conserver une vision globale, il est nécessaire d'avoir une représentation générique des systèmes. Dans cet objectif, la modélisation fonctionnelle a été choisie pour sa capacité à considérer des systèmes de taille industrielle et de proposer des points de vue de niveaux d'abstraction différents qui sont plus adaptés à des prises de décision effectuées également à différents niveaux.

Le processus de niveau système représente le niveau d'abstraction le plus haut et considère le système comme un élément unique dans son environnement (comparable au niveau A-0 du modèle SADT). Il est décomposé en sous-processus supportés par des sous-systèmes et assurant chacun leur propre fonction, et où l'ensemble des sous-systèmes constituent le système et l'ensemble des sous-fonctions constituent la fonction du système. Le processus de niveau système est donc décomposé par une succession de processus de niveau sous-système consommant des flux provenant de processus amont et créant d'autres flux consommés par des processus aval. Un exemple est donné sur la figure 33 où un processus de niveau système (« accumuler de la bande ») est décomposé en trois sous-processus (extrait de la plateforme TELMA décrite au chapitre suivant).

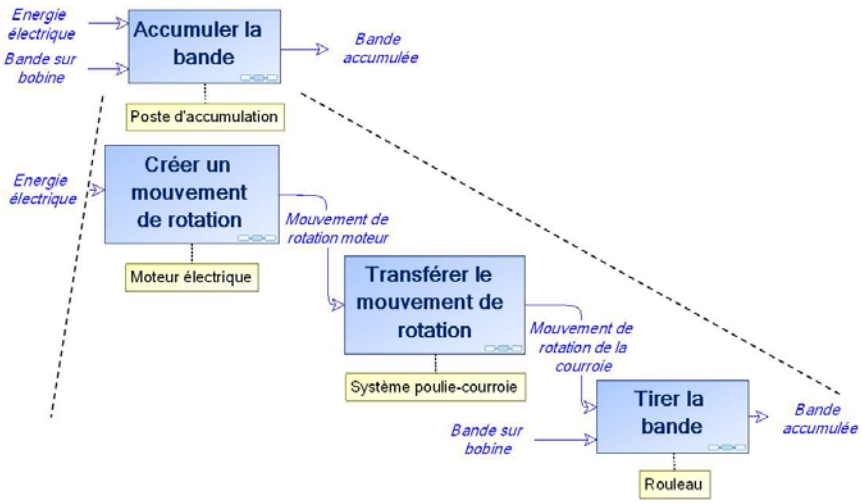


Figure 33. Décomposition récursive du processus d'accumulation

De manière récursive, chaque processus de niveau sous-système peut également être décomposé en un ensemble de processus de niveau inférieur reliés par les flux entrants/sortants. Cette décomposition est possible jusqu'aux processus de niveaux élémentaires supportés par des composants physiques du système.

Cette modélisation permet d'aboutir à une chaîne fonctionnelle reliée par les flux. Ceux qui ne relient pas deux processus, c'est-à-dire les flux entrants/sortants de la chaîne, sont également les flux entrants/sortants du niveau supérieur (en lien avec le contexte). Ainsi la décomposition de niveau composant aboutit à une chaîne contenant la succession de tous les processus élémentaires qui composent le système et qui possèdent les mêmes flux entrants/sortants que le système. Cette chaîne forme donc une représentation fonctionnelle détaillée du système.

II.1.3. Définition de la performance composant

La définition de la performance système est basée sur la modélisation des processus de niveau système. Ce modèle étant générique vis-à-vis des niveaux sous-système et composant, les performances sous-système et composant sont définies suivant les mêmes principes, à savoir qu'elles sont reliées à leurs flux sortants. Cela a pour conséquence que les flux sortants d'une chaîne de processus (non connectés à un autre processus) de niveau bas permettent de représenter aussi les performances du niveau supérieur.

II.2. Les indicateurs à pronostiquer

Les pronostics de performances, mais également de modes de dégradation/défaillance doivent s'appuyer sur des variables quantifiables pouvant être évaluées. Ces variables sont des indicateurs de performance ou de dégradation.

II.2.1. Les indicateurs de performance

Les performances sont connectées avec les flux : ainsi, les indicateurs doivent permettre d'évaluer l'état des flux. Pour cela, les caractéristiques des flux, nommées propriétés, permettent de représenter l'état de ce flux (e.g. pression/température d'un fluide ou couple/vitesse angulaire pour un mouvement de rotation). Ces états peuvent être représentatifs du flux lui-même ou des objets du flux. Selon (Mayer, 1995) le flux ne possède intrinsèquement qu'une seule propriété (le débit), les autres propriétés étant représentatives de l'état des objets composant le flux. Toutefois, toutes ces propriétés sont traitées de façon identique dans ce travail sous le nom de propriétés de flux.

Dans le cas de performances résultantes, ces propriétés sont directement les indicateurs de performance et évoluent et s'éloignent au cours du temps des valeurs nominales. Sur la base des principes et du vocabulaire employés dans la méthode HAZOP, le terme de déviation de propriété de flux est utilisé pour décrire ce phénomène au lieu de dégradation de flux, au sens où la valeur de la propriété du flux dévie de la valeur nominale pour un mode de fonctionnement donné, c'est-à-dire des conditions opérationnelles et environnementales données. Dans le cas de la performance propre, l'indicateur est construit par le rapport entre les propriétés du flux sortant et les propriétés des flux entrants (de contrôle ou d'énergie) et contient la perte de performance due au processus considéré uniquement. Ces indicateurs permettent de comparer quantitativement les niveaux de performance attendus et réels ce qui permet d'aboutir à la définition de la défaillance fonctionnelle (les performances réelles ne se situent plus dans des plages acceptables vis-à-vis des performances attendues).

Enfin, ces indicateurs de performance sont associés à un niveau d'abstraction spécifique (système, sous-système ou composant). Pour les performances résultantes, les indicateurs de niveau système permettent de visualiser des comportements globaux sur des horizons temporels importants (e.g. cadence de production moyenne…) et les indicateurs de niveau composant décrivent l'état physique du flux (e.g. pression, température…) sur des périodes temporelles plus courtes. Ainsi, sur un même flux peuvent être définis des indicateurs de niveau composant et des indicateurs de niveau système. Pour les performances propres, l'indicateur est significatif du processus situé entre les flux entrants et sortants utilisés pour calculer la performance. Ainsi, en utilisant des flux entrants et sortants d'un processus de niveau S/SS/C, on obtient un indicateur de même niveau. Par exemple, pour le système défini fonctionnellement figure 33, les performances résultantes de la fonction « Transférer le mouvement de rotation » sont les propriétés du flux « Mouvement de rotation de la courroie ». Ce

type de flux (rotation mécanique) possède un ensemble de propriétés telles que le couple, la vitesse de rotation, la puissance mécanique… Ces propriétés sont donc directement les indicateurs de performance résultante. Pour les performances propres, ces propriétés doivent être comparées aux flux entrants. Dans cet exemple, le flux entrant est également un flux de rotation mécanique et possède donc les mêmes propriétés. Les rapports entre les puissances fournies au composant et produit par lui, entre les couples ou les vitesses de rotations permettent d'évaluer l'efficience et l'efficacité de la fonction élémentaire. Le flux produit est envoyé à la fonction « Tirer la bande » dont le flux de sortie est également le flux de sortie du niveau système. Sur ce flux, des propriétés comme la quantité de bande accumulée (ou débit) peut être utilisée : l'intervalle de temps donné pour obtenir cette propriété peut permettre de différencier un indicateur de performance de niveau composant et un indicateur de niveau système.

II.2.2. Les indicateurs de dégradation

Les indicateurs de dégradation sont porteurs de la dynamique d'un ou plusieurs modes de dégradation/défaillance altérant la fonction du processus. Ils peuvent être associés à des caractéristiques physiques de la dégradation, observées de façon directe (e.g. allongement de la courroie, longueur d'une fissure…) où être des phénomènes induits par les modes de dégradation (symptômes) observés indirectement (e.g. vibrations, échauffement d'un moteur…). Ils sont donc représentatifs de l'état du composant alors que les indicateurs de performance sont représentatifs de l'état du flux sortant (figure 34). Toutefois dans certains cas, des indicateurs de performance propre (efficience…) sont l'unique moyen d'observer des modes de dégradations spécifique. Dans ce cas ils peuvent être considérés comme des symptômes des modes de dégradation (e.g. dans le cadre de système bouclé, le rendement énergétique du composant peut jouer le rôle de symptôme).

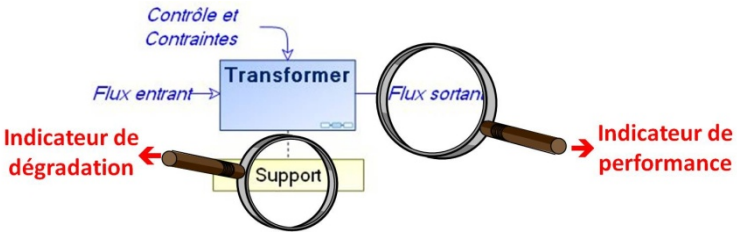


Figure 34. Décomposition récursive du processus d'accumulation

II.2.3. Les stratégies de projection des indicateurs

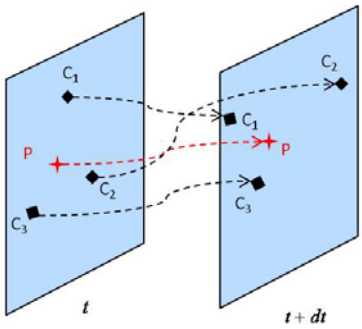
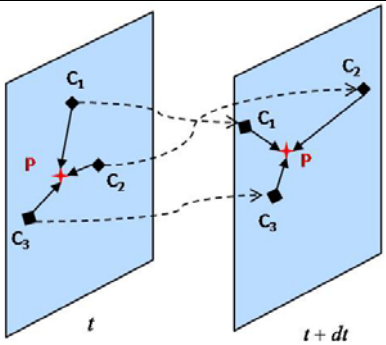
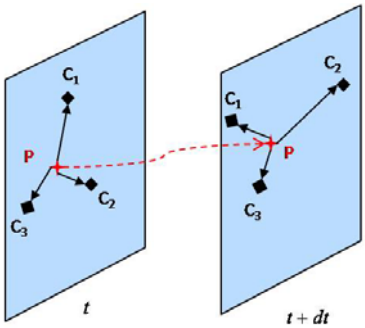
Les relations existantes entre les indicateurs de performance et les indicateurs de dégradation nécessitent d'envisager une stratégie afin d'obtenir, en fonction de la connaissance disponible, l'ensemble des indicateurs recherchés. Ces liens sont dus à la causalité dysfonctionnelle (*cf* chapitre 1) qui exprime les dégradations des composants comme causes des pertes de performances. Il est donc possible d'exprimer certains indicateurs en fonction d'autres.

Dans ce contexte, l'obtention du futur des indicateurs peut être résumée par deux tâches :

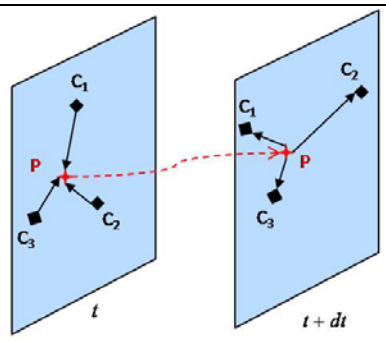
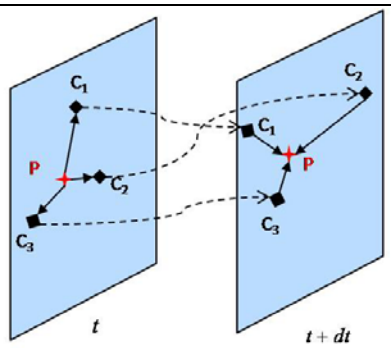
- la projection qui permet à une caractéristique d'évoluer dans le temps (vue diachronique),
- le calcul d'indicateurs non projetés (performance ou dégradation) en fonction des indicateurs projetés (vue synchronique). Cette opération peut :
    - être réalisée par des fonctions d'agrégation calculant les indicateurs de performance en fonction des indicateurs de dégradation,

- être réalisée par des fonctions de désagrégation (fonction inverse de la fonction d'agrégation) calculant les indicateurs de dégradation en fonction des indicateurs de performance,
- ne peut pas être réalisée compte tenu de la trop faible connaissance disponible.

Plusieurs stratégies de projection, décrites ci-dessous, peuvent ainsi être définies en fonction des choix des indicateurs projetés et calculés.

 *1) Dégradation $C_i(t+dt)= g$ (temps, $C_i(t)$, CO)*[1] *2) Performance P (t+dt)= h (temps, P(t), CO)*	Cas 1 : il n'y a pas de relation entre dégradation et performance. L'ensemble des indicateurs est projeté de façon indépendante.
 ***1) Performance P(t) = f (Dégradation $C_i(t)$),*** ***2) Dégradation $C_i(t+dt)= g$ (temps, $C_i(t)$, CO),*** ***3) Performance P(t+dt) = f (Dégradation $C_i(t+dt)$),***	Cas 2 : les indicateurs de dégradation sont projetés. Les indicateurs de performance sont calculés à partir des dégradations par des fonctions d'agrégation dans la tranche de temps *t+dt*.
 ***1) Dégradation $C_i(t) = f_i^{-1}$ (Performance P(t))*** ***2) Performance P (t+dt)= h (temps, P(t), CO),*** ***3) Dégradation $C_i(t+dt) = f_i^{-1}$ (Performance P(t+dt))***	Cas 3 : les indicateurs de performance sont projetés et les indicateurs de dégradation sont obtenus par des fonctions de désagrégation à la tranche de temps *t+dt.*

[44] Abréviations : C_i : composant i ; P : Performance ; t : temps ; CO : Conditions opérationnelles et maintenance

 **1) Performance $P(t) = f$ (Dégradation $C_i(t)$)** **2) Performance $P(t+dt) = h$ (temps, $P(t)$, CO)** **3) Dégradation $C_i(t+dt) = f_i^{-1}$ (Performance $P(t+dt)$)**	Cas 4 : les indicateurs de dégradation sont connus à l'instant de début de projection. Les indicateurs de performance sont obtenus par les fonctions d'agrégation puis sont projetés. Enfin, les évolutions futures des indicateurs de dégradations sont calculées par les fonctions de désagrégation à la tranche *t+dt*.
 **1) Dégradation $C_i(t) = f_i^{-1}$ (Performance $P(t)$),** **2) Dégradation $C_i(t+dt) = g$ (temps, $C_i(t)$, CO),** **3) Performance $P(t+dt) = f$ (Dégradation $C_i(t+dt)$),**	Cas 5 : les indicateurs de performance sont connus à l'instant de début de projection. Les indicateurs de dégradations sont obtenus par les fonctions de désagrégation puis sont projetés. Enfin, les indicateurs de performances futurs sont calculés par les fonctions d'agrégation.

Les cas 3, 4 et 5 imposent la connaissance des fonctions de « désagrégations ». Or, l'hypothèse de causalité dysfonctionnelle permet de considérer, sans trop d'erreur, qu'une performance est impactée par l'agrégation de multiples dégradations et/ou pertes de performance de composants amont. Ainsi, le calcul d'une performance est effectué à partir de différentes variables de dégradation.

Dans l'autre sens (désagrégation), on se heurte à la difficulté d'obtenir des systèmes d'équations ayant un nombre d'inconnus (ici les dégradations) permettant d'identifier les fonctions de désagrégation. Par conséquent, l'obtention des fonctions de désagrégation est pratiquement impossible à réaliser ce qui ne permet pas d'envisager leur utilisation dans la recherche de méthodes génériques applicables à une majorité de systèmes. On constate également que les cas 4 et 5 utilisent successivement trois modèles (agrégation, projection puis désagrégation pour le cas 4, désagrégation, projection puis agrégation pour le cas 5). Ceci aurait pour effet de cumuler trois erreurs de modélisation au lieu de deux erreurs pour les autres cas.

Pour toutes ces remarques, nous ne considérons pas ces stratégies (cas 3, 4 et 5) dans ce travail mais uniquement les cas 1 et 2 qui permettent d'obtenir l'ensemble des indicateurs de performances et de dégradations. Un pronostic basé sur ces stratégies de projection nécessite une organisation rigoureuse reposant sur des architectures de pronostic. Le cas 1 repose sur l'architecture que nous nommons **architecture étagée** et le cas 2 sur l'**architecture cumulée**. Ces deux architectures sont constituées d'éléments (modèles de projection ou d'agrégation) qui doivent être organisés. Ainsi la partie III détaille ces éléments puis la partie IV présente les architectures.

III. Le pronostic des indicateurs

L'ensemble des évolutions futures des indicateurs de dégradation et de performance doit être obtenu afin de respecter les attentes du pronostic système. Pour un indicateur particulier, deux méthodes permettent d'estimer son évolution future : soit il est projeté, soit il est calculé à partir d'évolutions d'autres indicateurs (modèle d'agrégation). Plus spécifiquement, seuls les indicateurs de performance peuvent faire l'objet d'un modèle d'agrégation. Ainsi les modèles de pronostic élémentaires sont utilisés pour tous les indicateurs de dégradation mais aussi pour les indicateurs de performance. Les architectures reposent donc sur ces modèles qui constituent des briques élémentaires à assembler.

III.1. Modèle de pronostic d'indicateurs de dégradation

Ces modèles sont des instances de la modélisation générique présentée au chapitre précédent avec les deux flux de sortie : état/performance futur et RUL. La figure 35a (resp. figure 35b) présente la particularisation du modèle générique sur un pronostic d'indicateur de dégradation (resp. performance). De plus, comme l'a mis en évidence l'étude bibliographique, les pronostics de composant, et notamment leurs modèles de projection, ont fait l'objet de nombreuses propositions. Ce travail n'ayant pas pour but de faire spécifiquement une nouvelle proposition de ce type, les pronostics d'indicateurs de dégradation que nous utilisons dans notre contribution sont basés sur des travaux existants. L'étude bibliographique a également montré que la majorité des modèles de projection n'intègrent pas les informations décrivant le contexte opérationnel futur et la maintenance. Ainsi dans le cadre de certaines applications, des modèles ne possédant pas toutes les caractéristiques peuvent être toutefois utilisés.

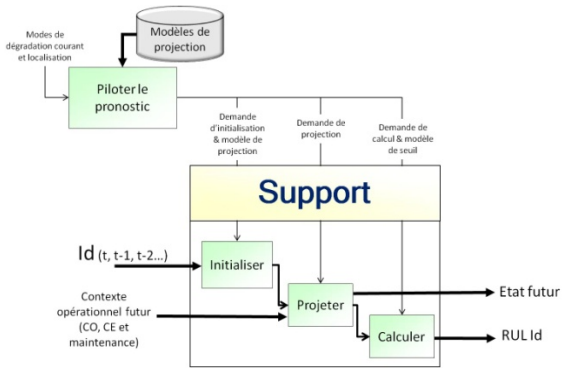


Figure 35a. Instanciation de la décomposition générique sur les pronostics d'indicateurs de dégradation

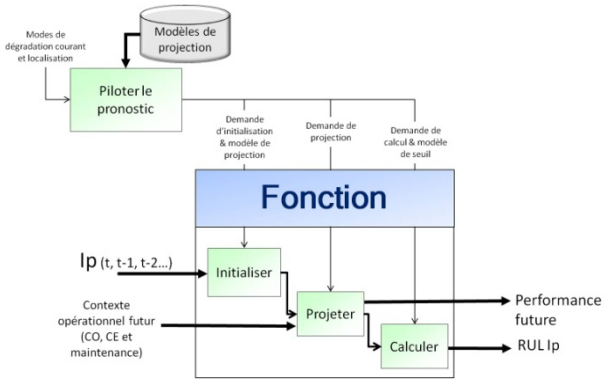


Figure 35b. Instanciation de la décomposition générique sur les pronostics d'indicateurs de performance

Cependant, les modèles choisis doivent respecter la contrainte de fournir les indicateurs de dégradation futurs au modèle d'agrégation. Ce dernier a besoin en entrée d'un état ce qui interdit la RUL qui représente un temps. C'est donc le flux sortant de la fonction de projection qui doit être fourni.

III.2. Modèle d'agrégation des performances de niveau composant

Les modèles d'agrégation permettent d'évaluer les évolutions des performances en fonction des évolutions d'autres indicateurs. Au niveau d'un composant, ce principe s'appuie sur le concept de

causalité dysfonctionnelle qui a été modélisé au niveau composant par (Léger, 1999) sous la forme d'une équation logique que nous rappelons :

$$Etat\ du\ flux\ entrant\ \wedge\ Etat\ de\ santé\ du\ composant \rightarrow Etat\ du\ flux\ sortant \qquad [1]$$

Cette équation exprime le lien de causalité entre la dégradation et la performance mais également l'impact des flux entrants. L'état de santé du composant est l'état du composant par rapport à l'avancement des modes de dégradation, il est donc représentatif de l'état physique en termes de niveau de dégradation. Sur cette base, un modèle peut être construit des performances de niveau composant pouvant ensuite constituer une brique d'un modèle plus complet de niveau système.

Il est à noter que dans d'autre cas, le flux entrant peut également directement provoquer l'apparition ou modifier l'évolution de modes de dégradations/défaillances (e.g. une surtension électrique, une surpression hydraulique…) du composant. Dans ce cas, les propriétés du flux doivent être envoyées au modèle de projection de l'indicateur de dégradation. La répercussion sur le flux sortant se fait donc *via* le modèle d'agrégation. Par exemple, une surtension provoque la défaillance du composant ce qui provoque une perte de performance. Ces cas concernent donc la réalisation du modèle de projection et ne seront pas traités dans ce travail.

Afin de développer l'équation [1], les états des flux entrants/sortants peuvent être précisés par leurs propriétés et l'état du composant par les indicateurs de dégradation. On peut écrire l'équation [1] sous la forme[45] :

$$\bigwedge_{0\leq i\leq n} Prop_i^{\ flux\ entrant}(t)\ \wedge \bigwedge_{0\leq j\leq m} Ind_j^{\ dégradation}(t) \rightarrow Prop_k^{\ flux\ sortant}(t)\ , k\ \in [0, l] \qquad [2]$$

Où n, m et l sont respectivement :

- le nombre de propriétés définies sur l'ensemble des flux entrants,
- le nombre d'indicateurs de dégradation définis sur le composant et
- le nombre de propriétés définies sur l'ensemble des flux sortants.

Cette formulation permet ainsi de déduire les performances résultantes du processus supporté par le composant. Elle représente une forme d'agrégation mais ne projette pas dans le futur. L'obtention des performances futures demande donc de connaître les indicateurs de dégradation futurs, obtenus par un processus de pronostic, et les flux entrants futurs. La figure 36 présente ces relations de causalité.

[45] Le symbole $\bigwedge$ représente la fonction logique ET

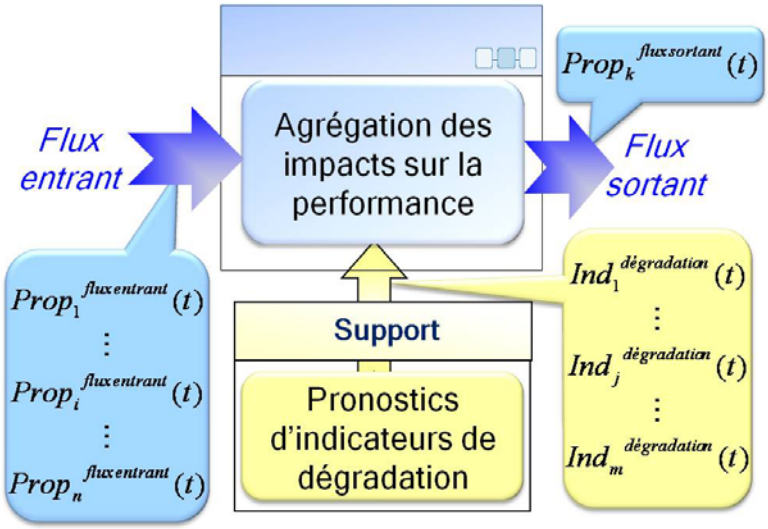


Figure 36. Représentation de la causalité dysfonctionnelle au niveau composant

Le pronostic de toutes les performances d'un composant requiert un ensemble de modèles : m modèles de pronostic d'indicateur de dégradation (un modèle de pronostic pour chaque indicateur), et l modèles d'agrégation permettant d'obtenir les évolutions futures des indicateurs de performances (un modèle pour chaque propriété définie sur les flux sortants du composant). La connaissance des évolutions futures des n propriétés des flux entrants est également nécessaire et doit être fournie aux modèles d'agrégation (1 à n propriétés sont fournies à chaque modèle d'agrégation). Les performances obtenues étant de type résultante, une opération supplémentaire de comparaison entre flux entrants et sortants doit être réalisée pour en déduire les performances propres du composant.

La figure 37 illustre l'ensemble de ces concepts sur l'exemple de la fonction « **Transférer le mouvement de rotation** » supporté par le système poulie-courroie (voir figure 33). Ainsi les propriétés du flux d'entrée sont le couple, la vitesse de rotation, la puissance mécanique…, l'état de santé est obtenu à travers la longueur de la courroie et les performances résultantes sont le couple, la vitesse de rotation... Un modèle d'agrégation doit être construit pour chaque performance résultante (la figure 37 ne fait apparaître que la vitesse de rotation courroie).

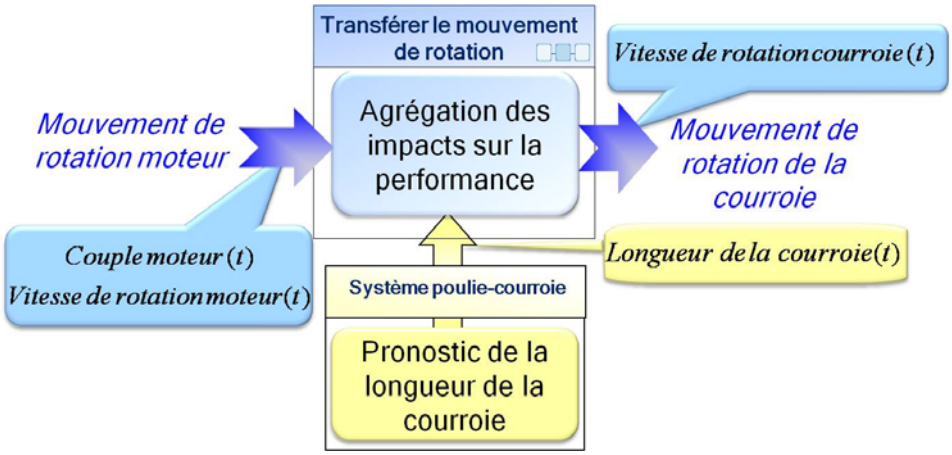


Figure 37. Exemple du système poulie-courroie

Avant de mettre en application ce modèle, il est nécessaire de formaliser le modèle d'agrégation. La partie III.3 propose une méthode basée sur la connaissance dysfonctionnelle disponible.

III.3. Méthode de construction du modèle d'agrégation des dégradations sur les performances

Ces modèles doivent permettre d'obtenir les performances résultantes (à travers les propriétés des flux sortants) du composant en fonction de son état (vu au travers des indicateurs de dégradation) et les performances résultantes de composants amont. Ils formalisent spécifiquement le lien de causalité dysfonctionnelle en basant leur construction sur la connaissance disponible provenant d'expertises ou de données historisées. La causalité dysfonctionnelle est composée de deux aspects :

- un aspect qualitatif, qui exprime les relations de causalité entre les modes de dégradations et les déviations de flux,
- un aspect quantitatif qui représente la propagation des modes de dégradation/défaillance et des déviations dans le système.

Les comportements résultants peuvent ainsi représenter des comportements nominaux ou des comportements dysfonctionnels. Le comportement nominal est nécessaire pour modéliser la causalité fonctionnelle d'un système composé de multiples composants où seul un sous-ensemble peut être affecté d'un comportement dysfonctionnel. Le modèle d'agrégation doit respecter plusieurs contraintes :

- une méthodologie de construction générique afin d'être applicable à une majorité de composants,
- la prise en compte des comportements nominaux et dysfonctionnels,
- l'adaptation à l'ensemble de la connaissance disponible et la possibilité d'intégrer une nouvelle connaissance dans le cadre d'un processus d'amélioration continue et de valorisation du REX.

La prise en compte de ces contraintes ne peut se faire qu'à travers une méthodologie de construction s'appuyant sur des outils génériques (figure 38). Tout d'abord le modèle d'agrégation doit permettre de modéliser l'aspect qualitatif de la causalité dysfonctionnelle. Dans cette méthode, leur modélisation repose sur des relations génériques qualitatives permettant d'intégrer tous les comportements nominaux ou dysfonctionnels. La mise en œuvre de telles relations demande une étape de particularisation : pour cela, la méthodologie s'appuie sur des analyses AMDEC (Norme X60-510 (AFNOR, 1986)) et HAZOP (norme IEC 61882 (IEC, 2001)) afin d'extraire la connaissance. Ces analyses ont l'avantage de résulter de méthodes génériques et d'obtenir la causalité dysfonctionnelle sous forme qualitative, correspondant ainsi parfaitement au besoin du processus de particularisation des relations génériques.

L'utilisation du modèle d'agrégation demande également de prendre en compte l'aspect quantitatif de la causalité dysfonctionnelle. Dans le cas de cette méthodologie, le choix d'outil basé sur la logique floue a été réalisé car :

- les indicateurs sont des variables continues qui sont modélisées dans les relations de façon discrète,

- l'ensemble des états discrets ne couvre pas entièrement l'espace des indicateurs continus obligeant d'utiliser dans la méthodologie un outil possédant une capacité d'interpolation (Bouchon-Meunier, 1995).

De plus, la diversité de la forme de la connaissance (expertise ou données) a orienté le choix vers les outils ayant des capacités d'apprentissage comme les modèles neuro-flou et notamment l'ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems) qui possède l'avantage de pouvoir exploiter la connaissance des relations dysfonctionnelles exprimées sous forme logique, appliquées sur des variables continues avec des capacités d'apprentissage et des qualités d'approximation de fonction (Jang, 1993). La construction de l'ANFIS représente les ultimes étapes de la méthodologie : la définition de sa structure est directement issue des relations particularisées et l'obtention des fonctions de fuzzification et défuzzification se réalise par le traitement de la connaissance disponible sur l'aspect quantitatif de la causalité dysfonctionnelle. Toutes ces étapes font l'objet des points suivants.

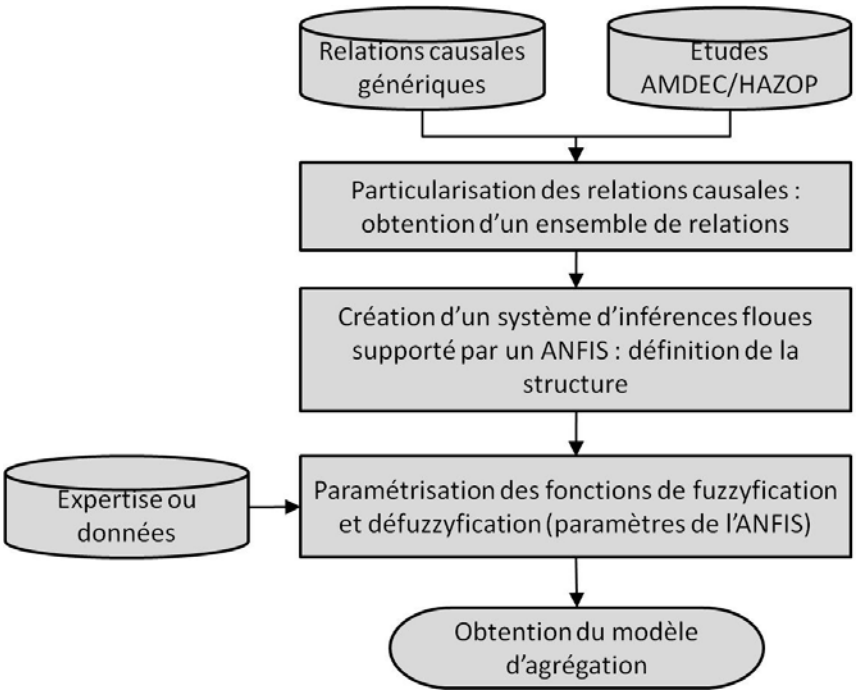


Figure 38. Méthodologie de construction du modèle d'agrégation

III.3.1. Les relations causales

La modélisation générique de la causalité dysfonctionnelle donnée par l'équation [1] a été étendue par (Muller *et al.*, 2004) en déclinant cette relation pour prendre en compte l'aspect fonctionnel et les aspects dysfonctionnels (dégradation et défaillance). Le résultat est une typologie de relations causales logiques (tableau 3) qui prend en compte le niveau de dégradation afin de différencier l'état dégradé (l'indicateur de performance est inférieur au niveau requis mais le système fonctionne) de l'état défaillant (le système ne fonctionne plus).

Tableau 3. Typologie des relations causales (Muller *et al.*, 2004)

		F	Flux	$\mathbf{X_n}$	état nominal
SP	support	**Fe**	Flux d'entrée	$\mathbf{X_d}$	état dégradé
R	relation	**Fs**	Flux de sortie	$\mathbf{X_f}$	état défaillant

Flux d'entrée	Etat du support	Flux de sortie	Comportement	Relation causale	Type
Fe_n	SP_n	Fs_n	nominal	$Fe_n \wedge SP_n \rightarrow Fs_n$	***R1***
Fe_d	SP_n	Fs_d	dégradé	$Fe_d \wedge SP_n \rightarrow Fs_d$	***R2***
Fe_n	SP_d	Fs_d	dégradé	$Fe_n \wedge SP_d \rightarrow Fs_d$	***R3***
Fe_d	SP_d	Fs_d	dégradé	$Fe_d \wedge SP_d \rightarrow Fs_d$	***R4***
Fe_d	SP_d	Fs_f	défaillant	$Fe_d \wedge SP_d \rightarrow Fs_f$	***R5***
Fe_f	SP_n ou SP_d ou SP_f	Fs_f	défaillant	$Fe_f \wedge (SP_n \vee SP_d \vee SP_f) \rightarrow Fs_f$	***R6***
Fe_n or Fe_d	SP_f	Fs_f	défaillant	$(Fe_n \vee Fe_d) \wedge SP_f \rightarrow Fs_f$	***R7***

Ces relations forment ainsi une juxtaposition de trois modèles très simples :

- un modèle de fonctionnement nominal (relation R1),
- un modèle de l'impact de la dégradation du composant sur ses performances (relation R3, R4, R5 et R7),
- un modèle de l'impact des déviations des flux d'entrée du composant sur les performances du composant (relation R2, R4, R5 et R6). Ce modèle supporte l'impact de la dégradation des composants en amont ou des déviations des flux d'entrée du système.

Ces trois « sous-modèles » permettent de prendre en compte l'ensemble des situations fonctionnelles et dysfonctionnelles d'un composant. Il est important d'avoir un modèle contenant toutes les situations du composant (nominale, flux entrants déviés et/ou support dégradé).

III.3.2. Analyses dysfonctionnelles : AMDEC et HAZOP

La construction du modèle d'agrégation repose sur la connaissance issue d'analyses dysfonctionnelles. Elles consistent à identifier les modes de dégradation ou de défaillance des processus, puis à déterminer leurs causes et leurs conséquences sur les autres processus. Dans notre cas, cette analyse est menée grâce à la mise en œuvre de deux méthodes propres au domaine de la sûreté de fonctionnement (Villemeur, 1988) :

- l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) pour établir la causalité dysfonctionnelle de l'ensemble des modes de dégradations/défaillance,
- l'HAZOP (Hazard and Operability Study) pour établir la causalité dysfonctionnelle de l'ensemble des déviations de propriétés de flux.

Léger (Léger, 1999) a proposé de coupler ces deux méthodes pour avoir une vision totale des interactions entre les déviations de flux et les dégradations/défaillances des fonctions ou composants.

Etude AMDEC

La méthode AMDEC consiste à identifier de façon inductive les risques de dysfonctionnement des systèmes, à en rechercher les origines et les conséquences, afin de proposer des actions correctives (Norme X60-510 (AFNOR, 1986)). L'analyse débute par le recensement des modes de dégradation/défaillance de chaque fonction ou composant. Ensuite, il faut déterminer leurs causes (modes de dégradation/ défaillance d'autres composants, phénomène physique…) ainsi que leurs conséquences (déviations de flux sortants).

Etude HAZOP

La méthode HAZOP est également une méthode inductive permettant d'identifier les causes et conséquences de la déviation d'un flux. Elle s'intéresse aux flux de Matière, d'Energie et d'Information échangés entre processus, alors que l'AMDEC s'intéresse à leurs fonctions ou supports. Les deux méthodes sont donc complémentaires. Pour chaque déviation vraisemblable, on détermine les causes (modes de dégradation/défaillance de composants, déviation des flux d'entrée …) ainsi que les conséquences (déviations de flux sortants, modes de dégradation/défaillance). La norme IEC 61882 (IEC, 2001) propose des déviations génériques (tableau 4), balayant les principaux types de déviation existants et apportant une aide à la réalisation d'une étude HAZOP.

Tableau 4. Déviations génériques (IEC 61882 (IEC, 2001))

PAS DE	Négation complète
PLUS DE	Augmentation quantitative
MOINS DE	Diminution quantitative
PARTIE DE	Diminution qualitative
PARTIE SUPPLEMENTAIRE	Augmentation qualitative
AUTRE QUE	Substitution complète
INVERSE	Contraire logique

III.3.3. Particularisation des relations causales

Les relations génériques imposent d'être particularisées pour leur mise en œuvre dans une application. Dans notre cas, nous nous basons principalement sur l'analyse HAZOP qui comporte les causes des déviations des flux sortants, c'est-à-dire des pertes de performance recherchées. Les déviations sont liées aux flux (à travers leurs propriétés) de matière, d'énergie ou d'information. Pour les deux premiers types, les propriétés sont des variables quantitatives. Nous pouvons restreindre l'ensemble de ces déviations génériques à l'ensemble {PAS DE, MOINS DE, PLUS DE}. Les flux d'informations présentent deux aspects : l'élément support au transport de l'information (e.g. signal électrique) et l'information elle-même qui peut être :

- supportée par une caractéristique de l'élément support (variable analogique) ou
- contenu à l'intérieur du support (variable numérique).

Dans le premier cas, le flux d'information peut être traité de façon identique aux flux de matière ou d'énergie. Dans le second cas, l'anomalie peut toucher soit l'élément support traité avec les déviations {PAS DE, MOINS DE, PLUS DE}, soit uniquement le contenu. Dans ce dernier cas la déviation AUTRE QUE est utilisée, marquant un contenu autre que le contenu valide. L'ensemble des déviations génériques se limite donc à {PAS DE, MOINS DE, PLUS DE, AUTRE QUE}. Les flux étant

représentés dans les relations causales sous la forme de trois états possibles (nominal, dégradé ou défaillant), il est nécessaire de les faire correspondre avec les déviations.

L'état dégradé du flux représente une perte partielle de performance. Cet état correspond à une déviation des propriétés de type MOINS DE, PLUS DE ou AUTRE QUE. L'état défaillant signifie une perte totale du flux donc la déviation générique correspondante est PAS DE. Enfin, l'état nominal est un état où il n'y a pas de perte de performance, donc pas de déviation. Dans ce cas, le niveau de la propriété du flux est OK.

L'état du support est également décrit par trois niveaux : nominal, dégradé ou défaillant. L'état nominal doit donc représenter l'état sans mode de dégradation/défaillance en cours, l'état dégradé, l'existence d'un mode de dégradation en cours uniquement et l'état défaillant, l'existence de mode de défaillance en cours. Ainsi, chaque indicateur de performance (resp. de dégradation) se voit attribuer un ensemble de variables associées à des niveaux caractérisant leurs déviations (resp. leurs états) :

- les déviations PAS DE et OK et des déviations parmi PLUS DE, MOINS DE et AUTRE QUE pour les indicateurs de performance,
- les états défaillant, dégradé et OK pour les indicateurs de dégradation.

Un exemple illustratif est donné figure 39, et l'analyse HAZOP associée est présentée dans le tableau 5Tableau 5. Ce composant a deux indicateurs de dégradation associés, l'un représentatif du mode de défaillance 1 ($Ind_1^{défaillance}$) et l'autre représentatif de mode de dégradation 2 ($Ind_2^{dégradation}$). Une distinction mode de dégradation/mode de défaillance peut être faite car les modes de dégradation sont causes de déviations PLUS DE ou MOINS DE ou AUTRE QUE et les modes de défaillance sont causes uniquement de PAS DE. Toutefois ces modes peuvent être observés à travers deux indicateurs différents (comme dans cet exemple) ou à travers un même indicateur qui différencierait les deux modes en fonctions de sa valeur.

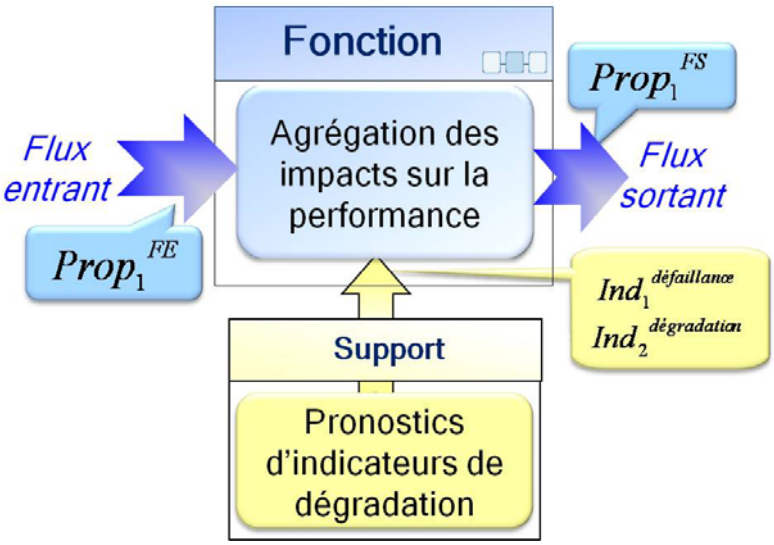


Figure 39. Exemple simple de composant

Tableau 5. Exemple d'analyse HAZOP

Propriété	Déviations	Causes
$Prop_1^{FS}$	PAS DE	PAS DE ($Prop_1^{FE}$)
		Mode de défaillance 1
	MOINS DE	MOINS DE ($Prop_1^{FE}$)
		Mode de dégradation 2
	PLUS DE	PLUS DE ($Prop_1^{FE}$)

L'association entre le résultat de l'analyse HAZOP et les relations permet d'établir un système d'implications composé de trois variables d'entrée discrètes :

- $Prop_1^{FE}$ prenant les valeurs PLUS DE, OK, MOINS DE et PAS DE,
- Mode de dégradation 2 prenant les valeurs Mdeg2 (mode en cours) et OK_2 (le mode n'est pas apparu),
- Mode de défaillance 1 prenant les valeurs Mdef1 (mode en cours) et OK_1 (le mode n'est pas apparu).

Chaque indicateur ne se voit pas attribuer chacune des variables de manière automatique, e.g. $Ind_1^{défaillance}$ de l'exemple précédent s'est vu attribuer deux variables Mdef1 (état défaillant) et OK et $Ind_2^{dégradation}$ les variables Mdeg2 (état dégradé) et OK uniquement. Ainsi deux modes de dégradation et défaillance sont soit totalement découplés soit des modes induits (le mode de dégradation devenant mode de défaillance lorsqu'il atteint un niveau de dégradation trop important).

Dans ce contexte, la particularisation des relations causales (du tableau 3) s'effectue par leur paramétrage avec la connaissance issue de l'analyse HAZOP dont l'application sur l'exemple est montrée dans le tableau 6 : ces relations traduisent directement la connaissance HAZOP du tableau 5 car les éléments de la colonne « causes » sont inscrits dans les premiers membres des relations et ceux de la colonne « Déviation » (les conséquences des causes) sont inscrites dans le second membre. À cette mise en forme, nous avons ajouté une relation prenant en compte le fonctionnement nominal inspirée de la relation R1 du tableau 3.

Tableau 6. Connaissance HAZOP sous formes d'implications logiques

Relation	N° relation
OK ($Prop_1^{FE}$) $\wedge$ OK_1 $\wedge$ OK_2 $\rightarrow$ OK ($Prop_1^{FS}$)	1
MOINS DE ($Prop_1^{FE}$) $\rightarrow$ MOINS DE ($Prop_1^{FS}$)	2
PLUS DE ($Prop_1^{FE}$) $\rightarrow$ PLUS DE ($Prop_1^{FS}$)	2'
Mdeg2 $\wedge$ $\rightarrow$ MOINS DE ($Prop_1^{FS}$)	3
PAS DE ($Prop_1^{FE}$) $\rightarrow$ PAS DE ($Prop_1^{FS}$)	4
Mdef1 $\rightarrow$ PAS DE ($Prop_1^{FS}$)	5

Ces relations doivent modéliser l'ensemble des situations possibles. Afin de vérifier leur cohérence, ces relations sont transcrites sous la forme de la table de vérité (tableau 7). Elle met en évidence que toutes les situations sont prises en compte mais que pour les situations 2, 3, 4, 8, 10, 11, 12, 14 et 16 plusieurs déviations de sortie sont possibles. On constate qu'à l'exception des situations 2 et 10, ces situations sont représentatives de l'occurrence simultanée de la dégradation et de la défaillance.

Dans ce cas, le composant est en état de panne et la déviation recherchée est PAS DE. Pour prendre en compte cette possibilité, nous proposons d'ajouter aux relations représentatives d'une dégradation (2, 2' et 3) le complément logique des variables représentatives de la défaillance (tableau 8). L'effet de cette modification est également retranscrit dans le tableau 7, validant ainsi la correction apportée.

Tableau 7. Table de vérité de vérification de cohérence

Numéro de situation	$Prop_1^{FE}$	Mode de défaillance 1	Mode de dégradation 2	$Prop_1^{FS}$			
				Avant modification (Tableau 6)		Après modification (Tableau 8)	
1	PLUS DE	OK_1	OK_2	PLUS DE	2'	PLUS DE	2'
2	PLUS DE	OK_1	Mdeg2	PLUS DE MOINS DE	2' 3	PLUS DE MOINS DE	2' 3
3	PLUS DE	Mdef1	OK_2	PLUS DE PAS DE	2' 5	PAS DE	5
4	PLUS DE	Mdef1	Mdeg2	PLUS DE MOINS DE PAS DE	2' 3 5	PAS DE	5
5	OK	OK_1	OK_2	OK	1	OK	1
6	OK	OK_1	Mdeg2	MOINS DE	3	MOINS DE	3
7	OK	Mdef1	OK_2	PAS DE	5	PAS DE	5
8	OK	Mdef1	Mdeg2	MOINS DE PAS DE	3 5	PAS DE	5
9	MOINS DE	OK_1	OK_2	MOINS DE	2	MOINS DE	2
10	MOINS DE	OK_1	Mdeg2	MOINS DE	2 3	MOINS DE	2 3
11	MOINS DE	Mdef1	OK_2	MOINS DE PAS DE	2 5	PAS DE	5
12	MOINS DE	Mdef1	Mdeg2	MOINS DE PAS DE	2 3 5	PAS DE	5
13	PAS DE	OK_1	OK_2	PAS DE	4	PAS DE	4
14	PAS DE	OK_1	Mdeg2	MOINS DE PAS DE	3 4	PAS DE	4
15	PAS DE	Mdef1	OK_2	PAS DE	4 5	PAS DE	4 5
16	PAS DE	Mdef1	Mdeg2	MOINS DE PAS DE	3 4 5	PAS DE	4 5

La situation 10 contient des dégradations dont les impacts s'accumulent pouvant aller jusqu'à la perte du flux sortant. La coexistence de ces deux relations permet de considérer l'impact cumulé de deux dégradations (dégradation de l'ensemble des composants amonts et dégradation du composant considéré). Ce cumul a pour effet d'augmenter la perte de performance de façon plus ou moins significative en fonction de la technologie utilisée ou du niveau d'avancement des dégradations, aboutissant soit à une déviation MOINS DE (perte partiel des performances) soit à une déviation PAS DE (perte totale des performances). Or cette méthode ne permet pas à cette situation d'atteindre la déviation PAS DE. Il est donc nécessaire d'ajouter une relation supplémentaire correspondant à la relation causale de type R5 de (Muller, 2005). Cette contrainte ajoute une relation supplémentaire (tableau 9).

Tableau 8. Relations après modification

Relation	N° relation
OK ($Prop_1^{FE}$) $\wedge$ OK_1 $\wedge$ OK_2 $\rightarrow$ OK ($Prop_1^{FS}$)	1
MOINS DE ($Prop_1^{FE}$) $\wedge$ $\overline{\text{Mdef1}}$ $\rightarrow$ MOINS DE ($Prop_1^{FS}$) PLUS DE ($Prop_1^{FE}$) $\wedge$ $\overline{\text{Mdef1}}$ $\rightarrow$ PLUS DE ($Prop_1^{FS}$)	2 2'
Mdeg2 $\wedge$ $\overline{\text{Mdef1}}$ $\wedge$ $\overline{\text{PAS ($Prop_1^{FE}$)}}$ $\rightarrow$ MOINS DE ($Prop_1^{FS}$)	3
PAS DE ($Prop_1^{FE}$) $\rightarrow$ PAS DE ($Prop_1^{FS}$)	4
Mdef1 $\rightarrow$ PAS DE ($Prop_1^{FS}$)	5

Tableau 9. Relation supplémentaire associée à la situation 10.

Relation
MOINS ($Prop_1^{FE}$) $\wedge$ Mdeg2 $\wedge$ $\overline{\text{Mdef1}}$ $\rightarrow$ PAS DE ($Prop_1^{FS}$)

Enfin, la situation 2 est la situation contraire à la précédente et les impacts des dégradations sont opposés. Le cumul de ces impacts peut donner trois comportements distincts : soit ils se compensent et ne créent pas de déviation résultante (OK), soit l'un des impacts est plus important que l'autre et crée une déviation (PLUS DE lorsque la déviation du flux entrant est plus impactante, MOINS DE lorsqu'il s'agit de la dégradation du composant). Pour représenter ce cas, il est nécessaire de garder les deux relations actives (2' et 3 dans notre cas) donnant ainsi aux flux les deux extrémités atteignables par la déviation réelle.

Tableau 10. Ensemble des relations issues de la méthode n°2

Relation	N° relation
OK ($Prop_1^{FE}$) $\wedge$ Pas de MD $\rightarrow$ OK ($Prop_1^{FS}$)	1
MOINS DE ($Prop_1^{FE}$) $\wedge$ $\overline{\text{Mdef1}}$ $\rightarrow$ MOINS DE ($Prop_1^{FS}$) PLUS DE ($Prop_1^{FE}$) $\wedge$ $\overline{\text{Mdef1}}$ $\rightarrow$ PLUS DE ($Prop_1^{FS}$)	2 2'
Mdeg2 $\wedge$ $\overline{\text{Mdef1}}$ $\wedge$ $\overline{\text{PAS ($Prop_1^{FE}$)}}$ $\rightarrow$ MOINS DE ($Prop_1^{FS}$)	3
MOINS ($Prop_1^{FE}$) $\wedge$ Mdeg2 $\wedge$ $\overline{\text{Mdef1}}$ $\rightarrow$ PAS DE ($Prop_1^{FS}$)	3'
PAS DE ($Prop_1^{FE}$) $\rightarrow$ PAS DE ($Prop_1^{FS}$)	4
Mdef1 $\rightarrow$ PAS DE ($Prop_1^{FS}$)	5

Au final, cette méthode a permis de proposer un ensemble de relations présentées dans le tableau 10, permettant de couvrir les situations atteignables. Nous proposons une version générique de ces relations en se basant sur le composant générique représenté figure 36. Cette mise en œuvre se réalise en trois temps : la relation du comportement nominal, les relations de défaillance et les relations de dégradations.

1) Relation du comportement nominal (relation n°1)

$$\left(\bigwedge_{0\leq i\leq n} OK(Prop_i{}^{flux\ entrant})\right) \wedge \left(\bigwedge_{0\leq j\leq m} OK\ (Ind_j{}^{dégradation})\right) \rightarrow OK(Prop_k{}^{flux\ sortant}), k\ \in [0,l] \qquad [3]$$

2) Relation de défaillance (relation n°4 et 5)[46]

En considérant que l'ensemble des m indicateurs de dégradation peut être partitionné en trois sous-ensembles:

- un ensemble de m_g indicateurs permettant d'observer des modes de dégradation uniquement,
- un ensemble de m_f indicateurs permettant d'observer des modes de défaillance uniquement,
- un ensemble de $m_{f\&d}=m-m_f-m_g$ indicateurs permettant d'observer des modes de dégradation aboutissant à un mode de défaillance.

$$\left(\bigvee_{0\leq i\leq n} PAS\ DE\ (Prop_i{}^{flux\ entrant})\right) \vee \left(\bigvee_{0\leq j\leq m_f} Mdef\ (Ind_j{}^{défaillance})\right) \vee \left(\bigvee_{0\leq j\leq m_{f\&d}} Mdef\ (Ind_j{}^{dégradation})\right) \rightarrow PAS\ DE(Prop_k{}^{flux\ sortant}),\quad k\ \in [0,l] \qquad [4]$$

3) Relations de dégradation

Pour chaque propriété du flux sortant, on partitionne en trois sous-ensembles les déviations des propriétés des flux entrants matérialisant un comportement dégradé:

- un ensemble de n_+ déviations représentant les déviations Dev^+_a (a ∈ [1, n_+]) ayant un impact positif sur la propriété (qui l'augmentent),
- un ensemble de n_- déviations représentant les déviations Dev^-_b (b ∈ [1, n_-]) ayant un impact négatif sur la propriété (qui la diminuent).
- un ensemble de $n_\neq$ déviations représentant les déviations $Dev^\neq_c$ (c ∈ [1, $n_\neq$]) créant des déviations de type AUTRE QUE.

De même on peut partitionner en trois l'ensemble des indicateurs de dégradation pouvant caractériser des modes de dégradation:

- un ensemble de m_+ indicateurs des modes de dégradation $Mdeg^+_a$ (a ∈ [1, m_+]) ayant un impact positif sur la propriété (qui l'augmentent),
- un ensemble de m_- indicateurs des modes de dégradation $Mdeg^-_b$ (b ∈ [1, m_-]) ayant un impact négatif sur la propriété (qui la diminuent).

[46] Le symbole $\vee$ représente la fonction logique OU

- un ensemble de $m_{\neq}$ indicateurs des modes de dégradation $Mdeg^{\neq}{}_{c}$ (c ∈ [1, $m_{\neq}$]) créant des déviations de type AUTRE QUE.

<u>Relations de dégradation de niveau 1 (relation n°2, 2' et 3)</u> : elles traduisent l'impact de chaque déviation ou d'un mode de dégradation traité individuellement.

$$\forall\, a \in [1, n_{+}],$$
$$\left(\bigwedge_{0\le i\le n} \overline{PAS\ DE\ (Prop_{i}{}^{flux\ entrant})}\right) \wedge \left(\bigwedge_{0\le j\le m_{f}} \overline{Mdef\ (Ind_{j}{}^{défaillance})}\right) \wedge \left(\bigwedge_{0\le j\le m_{f\&d}} \overline{Mdef\ (Ind_{j}{}^{dégradation})}\right) \wedge\ (Dev^{+}{}_{a}) \rightarrow PLUS\ DE(Prop_{k}{}^{flux\ sortant}),\quad k \in [0, l] \qquad [5]$$

$$\forall\, a \in [1, m_{+}],$$
$$\left(\bigwedge_{0\le i\le n} \overline{PAS\ DE\ (Prop_{i}{}^{flux\ entrant})}\right) \wedge \left(\bigwedge_{0\le j\le m_{f}} \overline{Mdef\ (Ind_{j}{}^{défaillance})}\right) \wedge \left(\bigwedge_{0\le j\le m_{f\&d}} \overline{Mdef\ (Ind_{j}{}^{dégradation})}\right) \wedge\ (Mdeg^{+}{}_{a}) \rightarrow PLUS\ DE(Prop_{k}{}^{flux\ sortant}),\quad k \in [0, l] \qquad [6]$$

$$\forall\, b \in [1, m_{-}],$$
$$\left(\bigwedge_{0\le i\le n} \overline{PAS\ DE\ (Prop_{i}{}^{flux\ entrant})}\right) \wedge \left(\bigwedge_{0\le j\le m_{f}} \overline{Mdef\ (Ind_{j}{}^{défaillance})}\right) \wedge \left(\bigwedge_{0\le j\le m_{f\&d}} \overline{Mdef\ (Ind_{j}{}^{dégradation})}\right) \wedge\ (Dev^{-}{}_{b}) \rightarrow MOINS\ DE(Prop_{k}{}^{flux\ sortant}),\quad k \in [0, l] \qquad [7]$$

$$\forall\, b \in [1, m_{+}],$$
$$\left(\bigwedge_{0\le i\le n} \overline{PAS\ DE\ (Prop_{i}{}^{flux\ entrant})}\right) \wedge \left(\bigwedge_{0\le j\le m_{f}} \overline{Mdef\ (Ind_{j}{}^{défaillance})}\right) \wedge \left(\bigwedge_{0\le j\le m_{f\&d}} \overline{Mdef\ (Ind_{j}{}^{dégradation})}\right) \wedge\ (Mdeg^{-}{}_{b}) \rightarrow MOINS\ DE(Prop_{k}{}^{flux\ sortant}),\quad k \in [0, l] \qquad [8]$$

$$\forall\, c \in [1, m_{\neq}],$$
$$\left(\bigwedge_{0\le i\le n} \overline{PAS\ DE\ (Prop_{i}{}^{flux\ entrant})}\right) \wedge \left(\bigwedge_{0\le j\le m_{f}} \overline{Mdef\ (Ind_{j}{}^{défaillance})}\right) \wedge \left(\bigwedge_{0\le j\le m_{f\&d}} \overline{Mdef\ (Ind_{j}{}^{dégradation})}\right) \wedge\ (Dev^{\neq}{}_{c}) \rightarrow AUTRE\ QUE(Prop_{k}{}^{flux\ sortant}),\quad k \in [0, l] \qquad [9]$$

$$\forall\, c \in [1, m_{\neq}],$$
$$\left(\bigwedge_{0\le i\le n} \overline{PAS\ DE\ (Prop_{i}{}^{flux\ entrant})}\right) \wedge \left(\bigwedge_{0\le j\le m_{f}} \overline{Mdef\ (Ind_{j}{}^{défaillance})}\right) \wedge \left(\bigwedge_{0\le j\le m_{f\&d}} \overline{Mdef\ (Ind_{j}{}^{dégradation})}\right) \wedge\ (Mdeg^{\neq}{}_{c}) \rightarrow AUTRE\ QUE(Prop_{k}{}^{flux\ sortant}),\quad k \in [0, l] \qquad [10]$$

<u>Relations de dégradation de niveau 2 (relation n°3')</u> : elles s'intéressent au cumul des dégradations. Ce cumul s'effectue uniquement sur des variables associées à des indicateurs quantitatifs, et qui impactent seulement les déviations des flux de sortie de type PLUS DE et MOINS DE. Les cumuls des dégradations ou déviations ayant un impact négatif sur la propriété du flux sortant peuvent aboutir à la déviation PAS DE ce qui demande donc d'être pris en compte par [11]. Les cumuls des dégradations ou déviations ayant un impact positif ont uniquement pour effet direct la déviation PLUS DE ([12]). L'augmentation d'une propriété peut en effet entraîner un mode de défaillance sur le support. Dans ce cas c'est ce mode qui induit une déviation PAS DE. Ainsi, l'augmentation de la propriété ne doit pas être prise en compte dans la modélisation de la causalité dysfonctionnelle mais uniquement dans le modèle de projection.

$$\left(\bigwedge_{0\le i\le n} \overline{PAS\ DE\ (Prop_i{}^{flux\ entrant})}\right) \wedge \left(\bigwedge_{0\le j\le m_f} \overline{Mdef\ (Ind_j{}^{défaillance})}\right) \wedge \left(\bigwedge_{0\le j\le m_{f\&d}} \overline{Mdef\ (Ind_j{}^{dégradation})}\right)$$
$$\wedge \left(\left(\bigvee_{\substack{(a,a')\in[1,n_-]\\ a\neq a'}} (Dev^-{}_a \wedge Dev^-{}_{a'})\right) \vee \left(\bigvee_{\substack{(b,b')\in[1,m_-]\\ b\neq b'}} (Mdeg^-{}_b \wedge Mdeg^-{}_{b'})\right)\right. \qquad [11]$$
$$\left.\vee \left(\bigvee_{b\in[1,m_-]} \bigvee_{a\in[1,n_-]} (Dev^-{}_a \wedge Mdeg^-{}_b)\right)\right) \rightarrow PAS\ DE(Prop_k{}^{flux\ sortant}),\quad k\in[0,l]$$

$$\left(\bigwedge_{0\le i\le n} \overline{PAS\ DE\ (Prop_i{}^{flux\ entrant})}\right) \wedge \left(\bigwedge_{0\le j\le m_f} \overline{Mdef\ (Ind_j{}^{défaillance})}\right) \wedge \left(\bigwedge_{0\le j\le m_{f\&d}} \overline{Mdef\ (Ind_j{}^{dégradation})}\right)$$
$$\wedge \left(\left(\bigvee_{\substack{(a,a')\in[1,n_+]\\ a\neq a'}} (Dev^+{}_a \wedge Dev^+{}_{a'})\right) \vee \left(\bigvee_{\substack{(b,b')\in[1,m_+]\\ b\neq b'}} (Mdeg^+{}_b \wedge Mdeg^+{}_{b'})\right)\right. \qquad [12]$$
$$\left.\vee \left(\bigvee_{b\in[1,m_+]} \bigvee_{a\in[1,n_+]} (Dev^+{}_a \wedge Mdeg^+{}_b)\right)\right) \rightarrow PLUS\ DE(Prop_k{}^{flux\ sortant}),\quad k\in[0,l]$$

Le résultat obtenu est une formalisation de la connaissance dysfonctionnelle sous forme d'équations logiques de règles d'expertises dans lesquelles l'espace de définition des variables est discret. Or les indicateurs de dégradation ou de performance sont de nature continue. L'utilisation d'une fonction de discrétisation classique est difficile car les états discrets ne sont représentatifs que d'un sous-espace de l'espace de départ (continu) ce qui demande une capacité d'interpolation. Ainsi l'outil recherché doit permettre de modéliser la causalité nécessitant une capacité d'approximation et d'interpoler entre les états discrets. La logique floue est un outil qui possède ces propriétés (Bouchon-Meunier, 1995). Dans ce cas, l'ensemble des règles est considéré comme un système d'inférence floue. Ce choix effectué implique de construire des fonctions de fuzzification et défuzzification permettant d'assurer la transition entre les espaces continus et discrets. La connaissance pour y parvenir provient de deux sources : l'expertise ou les données. Pour cela, le choix s'est porté vers des outils neuro-flou pour supporter un système d'inférence floue tout en conservant la propriété d'être paramétrables par un expert ou par apprentissage sur un ensemble de données.

III.3.4. Mise en œuvre des relations causales par un système d'inférences floues supporté par le modèle ANFIS

Un ensemble de travaux a permis de proposer un éventail d'outils neuro-flous qui se différencient par les choix du type de règle supportée (e.g. Mamdani, Tagaki-Sugeno,…), leur structure, etc (Abraham, 2001). Dans cet ensemble, l'ANFIS est certainement l'un des plus populaires et, à la différence des autres (e.g. NEFPROX, HyFIS… voir (Abraham, 2001)), se trouve déjà implanté dans de nombreux logiciels comme par exemple Matlab[47].

Le modèle ANFIS a déjà fait l'objet de travaux dans le domaine du pronostic. Il est utilisé comme outil de prédiction de séries temporelles par (El-Koujok *et al.*, 2008) et (Samanta and Nataraj, 2008). Ces derniers ont proposé une étude comparative entre le modèle et la méthode SVR (Support Vector Regression) alors que les auteurs de (Adeline *et al.*, 2008) utilisent l'ANFIS afin de maîtriser l'erreur de prédiction du pronostic. Notre choix de l'outil ANFIS se fonde ainsi sur son utilisation déjà reconnue dans le domaine du pronostic, pour sa capacité à intégrer de l'expertise et de l'apprentissage et ses capacités d'approximateur universel.

Présentation de l'ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems)

Le modèle ANFIS est un réseau de neurones flou proposé par (Jang, 1993). Ce réseau est composé de cinq couches représentées sur la figure 40 avec des entrées X_1, …, X_m. Les règles floues utilisées sont du type Takagi-Sugeno, c'est-à-dire à prémisses symboliques et conclusions numériques.

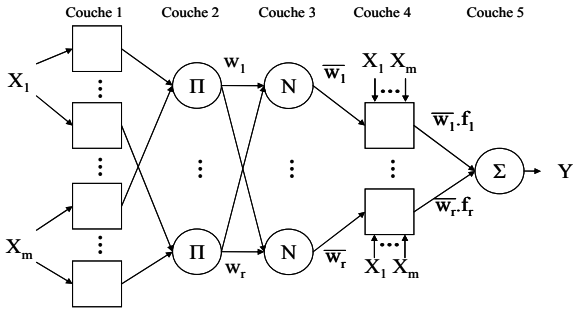


Figure 40. Structure de l'ANFIS.

On définit S_{ij} la sortie du $j^{\text{ème}}$ neurone de la $i^{\text{ème}}$ couche.

- 1^{ière} couche : Fuzzification

Cette couche permet de convertir les variables d'entrée dans l'espace flou à l'aide des fonctions d'appartenance.

$$S_{1j} = \mu_{lk}(X_k) \quad \text{avec} \quad l = 1, \dots, nk \quad \text{et} \quad k = 1, \dots, m \qquad [13]$$

où $\mu_{lk}(X_k)$ est le degré d'appartenance du $l^{\text{ème}}$ terme de la partition floue de la $k^{\text{ème}}$ variable d'entrée. Différents types de fonctions d'appartenance peuvent être utilisés : triangle, trapèze ou gaussienne par exemple. Les paramètres définissant ces fonctions sont appelés paramètres des prémisses.

[47] http://www.mathworks.fr/

- 2ième couche : Pondération des règles floues

Chaque neurone est associé à une règle floue et permet de définir le poids de cette règle à l'aide d'une t-norme. La t-norme la plus utilisée dans ce cas est le produit :

$$S_{2j} = \prod \mu_{lk} = w_j \qquad [14]$$

où μ_{lk} est le degré d'appartenance aux termes de la partition floue utilisés dans la $j^{ème}$ règle floue.

- 3ième couche : Normalisation

Cette couche a pour but de normaliser les différents poids.

$$S_{3j} = \frac{w_j}{\sum_{k=1}^{k=r} w_k} = \overline{w_j} \qquad [15]$$

pour tout les j = 1,…, r.

- 4ième couche : Défuzzification

Cette couche permet d'obtenir une sortie définie par une fonction du premier ordre des entrées et pondérée (approche de Takagi-Sugeno).

$$S_{4j} = \overline{w_j}.f_j \quad \text{avec} \quad f_j = \sum_k a_{jk}.X_k + b_j \quad \text{où} \quad k = 1, \dots, r \qquad [16]$$

La fonction f_j peut aussi être constante. Dans ce cas, tous les a_{jk}=0. Les paramètres a_{jk} et b_j des fonctions f_j sont appelés paramètres des conséquences.

- 5ième couche : Calcul de la sortie

La sortie Y est définie par la somme des sorties de la couche précédente :

$$S_5 = \sum_{j=1}^{j=r} S_{4j} = \sum_{j=1}^{j=r} \overline{w_j}.f_j \qquad [17]$$

L'ajustement des paramètres de l'ANFIS est réalisé soit par un expert, soit lors d'une phase d'apprentissage à l'aide d'un algorithme supervisé utilisant un ensemble de données associant entrées et sorties. Pour la réalisation de cette phase, des algorithmes d'apprentissage hybrides permettent de réduire leur complexité et d'améliorer l'efficacité de l'apprentissage (Li et Cheng, 2007). Le plus utilisé a été proposé par (Jang, 1993) avec une association entre deux méthodes exécutées consécutivement (Goebel et Bonissone, 2005) : la méthode d'estimation des moindres carrés ou LSM (Least Square Method) et la méthode de descente de gradient.

Premièrement la méthode LSM ajuste les paramètres conséquents en fixant les prémisses et en minimisant l'erreur quadratique moyenne entre la sortie obtenue par le réseau $\hat{Y}$ et la sortie réelle attendue Y donnée par l'ensemble d'apprentissage :

$$Erreur\ quadratique\ moyenne\ = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \left(Y_i - \hat{Y}_i\right)^2 \qquad [18]$$

Où n représente le nombre total de couples entrée/sortie de l'ensemble d'apprentissage.

Ensuite l'erreur-type (définie comme étant la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne) est utilisée par la méthode de descente de gradient permettant d'ajuster les prémisses en fixant les paramètres conséquents. L'apprentissage se fait de façon récursive jusqu'à ce que le nombre de cycles d'apprentissages soit atteint ou jusqu'à ce que l'erreur quadratique moyenne atteigne une valeur prédéterminée. Cette phase dépend donc de la qualité de l'ensemble des données au sens où cet ensemble doit représenter au mieux les différents comportements attendus.

L'ANFIS, comme tout réseau de neurones classique ou neuro-flou, demande de résoudre deux problèmes pour sa mise en œuvre : définir sa structure et la paramétrer. La problématique de la définition de sa structure est directement résolue puisque les règles présentées dans la partie précédente permettent de définir directement celle-ci. La question du choix des paramètres de l'ANFIS est quant à elle résolue par l'utilisation de la connaissance disponible, provenant soit d'experts soit de données d'apprentissage. Cette double solution aux problèmes conventionnels proposée par l'ANFIS conforte pour notre travail le choix de cet outil.

Définition de la structure de l'ANFIS

Les relations énoncées dans le tableau 11 permettent de définir la structure du modèle ANFIS représentée figure 41. Pour supporter notre démarche nous utilisons la boîte à outils « Fuzzy Logic » de Matlab[48].

Tableau 11. Règles structurant le modèle ANFIS

Relation	N° relation
OK ($Prop_1^{FE}$) $\wedge$ Pas de MD $\rightarrow$ OK ($Prop_1^{FS}$)	R1
PAS DE ($Prop_1^{FE}$) $\vee$ Mdef1 $\rightarrow$ PAS DE ($Prop_1^{FS}$)	R2
PLUS DE ($Prop_1^{FE}$) $\wedge$ $\overline{\text{Mdef1}}$ $\rightarrow$ PLUS DE ($Prop_1^{FS}$)	R3
MOINS DE ($Prop_1^{FE}$) $\wedge$ $\overline{\text{Mdef1}}$ $\rightarrow$ MOINS DE ($Prop_1^{FS}$)	R4
Mdeg2 $\wedge$ $\overline{\text{Mdef1}}$ $\wedge$ $\overline{\text{PAS ($Prop_1^{FE}$)}}$ $\rightarrow$ MOINS DE ($Prop_1^{FS}$)	R5
MOINS ($Prop_1^{FE}$) $\wedge$ Mdeg2 $\wedge$ $\overline{\text{Mdef1}}$ $\rightarrow$ PAS DE ($Prop_1^{FS}$)	R6

Il est à noter que la fonction ET est réalisée par la t-norme *produit* (f(a,b) = a.b) et la fonction OU est réalisée par la t-conorme *somme probabiliste* (f(a,b) = a + b – a.b). À la différence du modèle présenté par (Jang, 1993), Matlab réalise l'opération de normalisation dans la dernière couche du réseau (couche 5 de la figure 41), ce qui explique une structure légèrement différente.

[48] http://www.mathworks.fr/

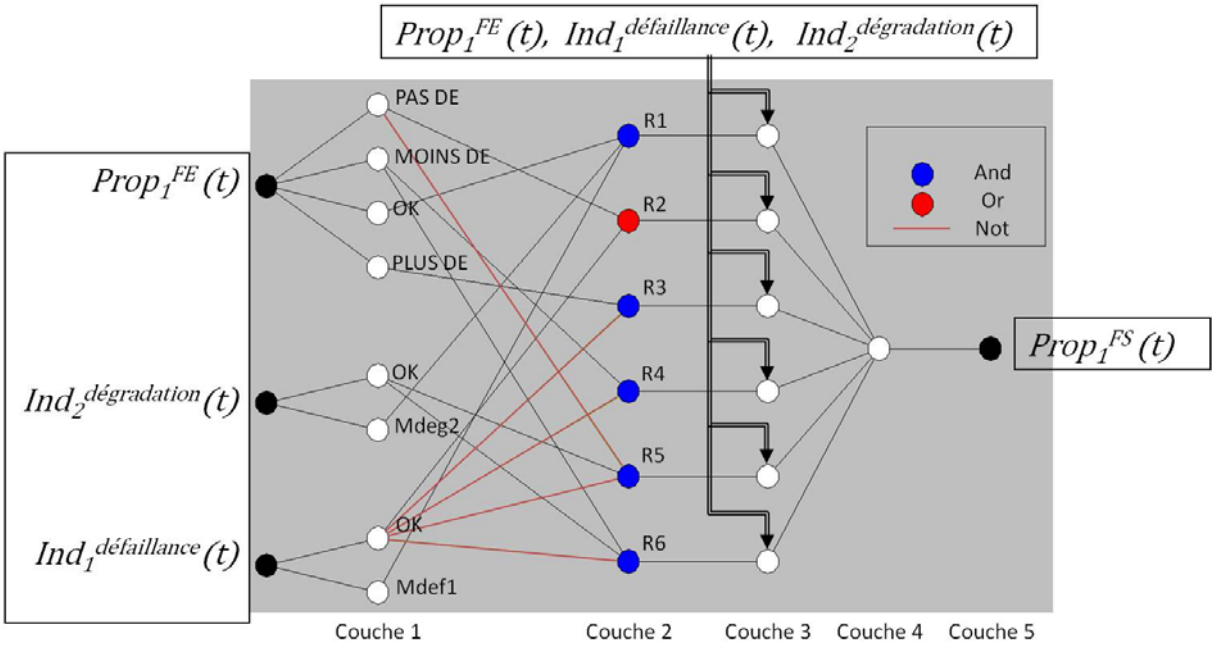


Figure 41. Structure de l'ANFIS donnée par les relations

III.3.5. Estimation des paramètres du modèle ANFIS : détermination des fonctions de fuzzification et défuzzification

Avant d'utiliser ce modèle, il est nécessaire de déterminer les paramètres de fuzzification et de défuzzification. Ces paramètres peuvent être déterminés par l'expertise ou en s'appuyant sur un ensemble de données d'apprentissage. Afin de dérouler notre méthodologie de construction de bout en bout, les paramètres de l'ANFIS seront définis dans notre cas à l'aide d'une expertise. Cette connaissance porte tout d'abord sur l'estimation de la répartition des déviations en fonction du niveau nominal des propriétés de flux (entrants et sortants) exprimées en pourcentage de la valeur nominale. Pour les modes de dégradation ou défaillance, la connaissance donne les intervalles où les indicateurs définissent l'état de façon certaine. Ces intervalles sont définis en fonction du pourcentage du niveau de l'indicateur par rapport à son niveau nominal (tel qu'il serait issu d'une maintenance de type remise à neuf).

Définition des paramètres des prémisses

Sans connaissance supplémentaire ou d'information sur les formes des fonctions d'appartenance, les fonctions linéaires (triangle ou trapèze) sont choisies et avec une contrainte de partition floue stricte, c'est-à-dire que la somme de tous les degrés d'appartenance est égale à un pour toutes les valeurs de l'indicateur. Pour les déviations du flux entrant, les valeurs exactes (pour OK et PAS DE) définissent le noyau[49] alors que les intervalles définissent les supports[50] des ensembles flous associés aux variables floues. Le résultat de cette partition floue basée sur l'expertise du tableau ci-dessous est donné figure 42.

[49] Le noyau Ã d'une partie floue A est l'ensemble des éléments qui appartiennent totalement à A c'est-à-dire dont le degré d'appartenance à A vaut 1.

[50] Le support Ă d'une partie floue A est l'ensemble des éléments appartenant, même très peu, à A c'est-à-dire dont le degré d'appartenance à A est différent de 0.

Expertise sur les propriétés des flux ($Prop_1^{FE}$ et $Prop_1^{FS}$) : (en pourcentage de la valeur nominale des propriétés)

OK (régime nominal)	100%
PAS DE	0%
MOINS DE	Entre 0 et 100%
PLUS DE	Supérieure à 100% (valeur max : 120%)

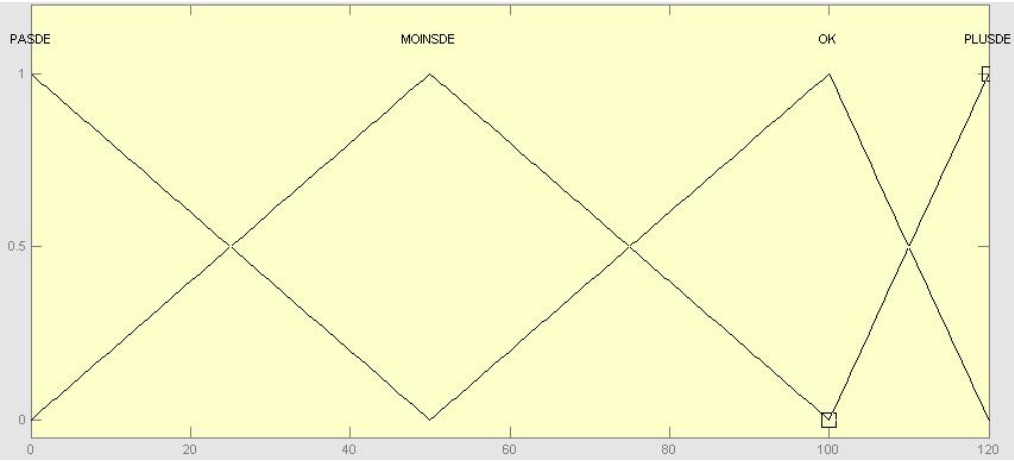


Figure 42. Fuzzification de la propriété du flux entrant

Pour les indicateurs de dégradation et défaillance, les résultats de l'expertise fournis dans les tableaux ci-dessous définissent les intervalles où l'état est connu de façon certaine, ce qui donne le noyau de chaque sous-ensemble flou (figure 43 pour la dégradation, figure 44 pour la défaillance).

Expertise sur les indicateurs de dégradation($Ind_2^{dégradation}$) : (en pourcentage de la valeur nominale de l'indicateur de dégradation)

OK	Supérieur à 75%
Mdeg2	Inférieur à 25%

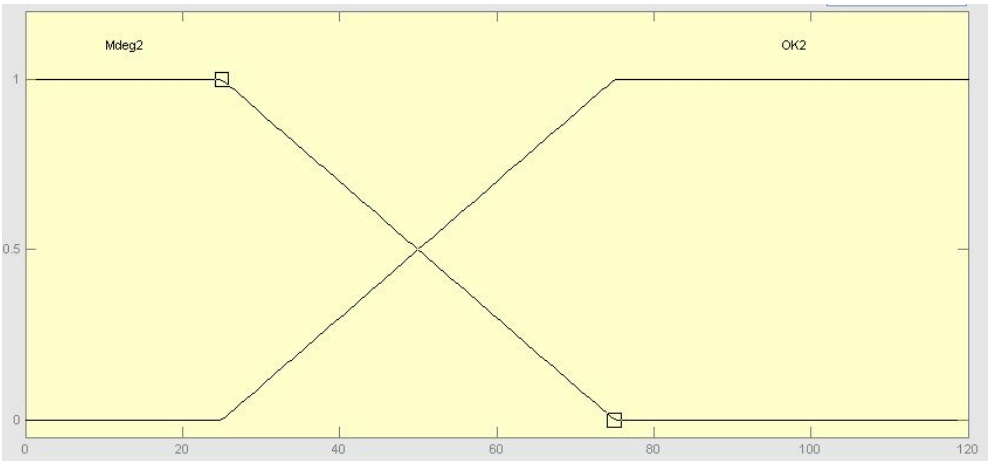


Figure 43. Fuzzification de l'indicateur de dégradation

Expertise sur les indicateurs de défaillance ($Ind_1^{défaillance}$): (en pourcentage de la valeur nominale de l'indicateur de dégradation)

OK	Supérieur à 75%
Mdef1	Inférieur à 25%

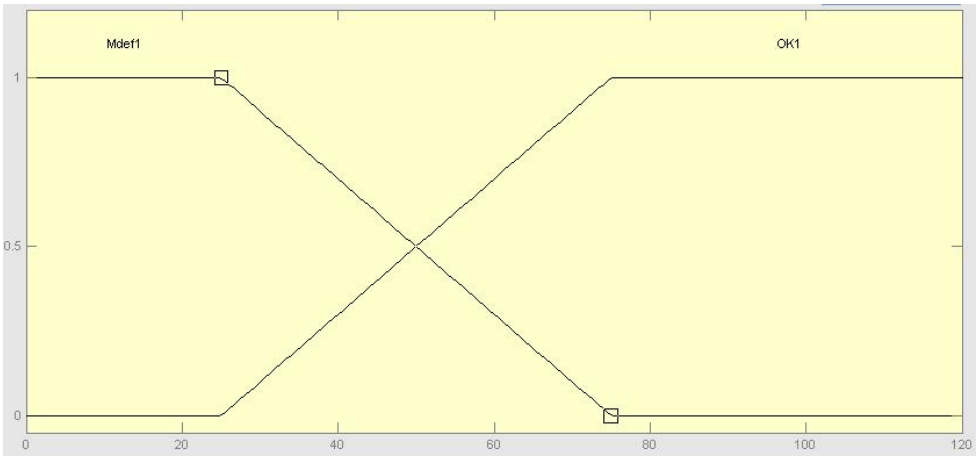


Figure 44. Fuzzification de l'indicateur de défaillance

Définition des paramètres conséquents

La connaissance disponible sur la partition floue de la propriété du flux sortant étant limitée, nous avons pris par hypothèse les fonctions les plus simples (fonctions constantes) qui s'appuient sur les noyaux. Les fonctions obtenues sont :

$$f_{PLUS\ DE} = 120$$
$$f_{OK} = 100$$
$$f_{MOINS\ DE} = 50$$
$$f_{PAS\ DE} = 0$$

[19]

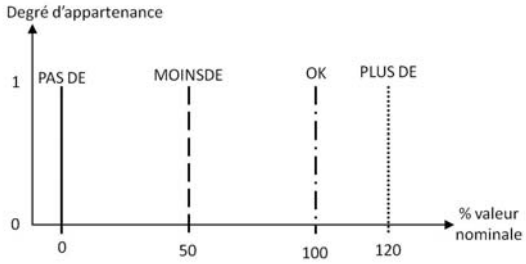


Figure 45. Défuzzification de la propriété du flux sortant

La figure 45 permet de représenter graphiquement ces fonctions constantes. Par exemple, le degré d'appartenance de la propriété OK est à 1 pour la valeur 100% et zéro pour les autres valeurs.

Ces derniers paramètres permettent de terminer la paramétrisation du modèle ANFIS et d'obtenir le modèle d'agrégation des dégradations et des déviations des flux entrants. Ce modèle peut donc être utilisé en lui fournissant le niveau des indicateurs $Ind_1^{défaillance}$ et $Ind_2^{dégradation}$ et le niveau de la propriété $Prop_1^{FE}$ (figure 46).

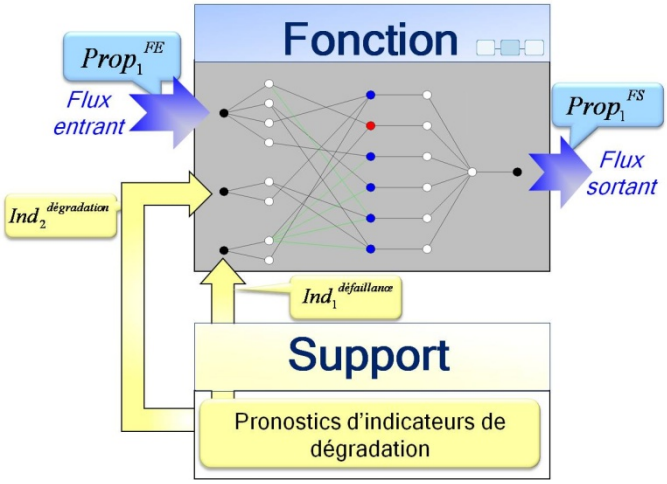


Figure 46. ANFIS paramétré permettant d'agréger dégradations et déviations

L'exemple ne possédant pas de données, aucune phase d'apprentissage ne peut être réalisée. Toutefois, lorsqu'elle existe, une base de données historisées permet de venir ajuster les paramètres définis permettant ainsi de combler partiellement l'imprécision de la connaissance issue d'une expertise. Le couplage entre le modèle de pronostic des indicateurs de dégradation/défaillance et le modèle d'agrégation, mais également les modèles de pronostic non couplés avec un ANFIS ont pour vocation d'obtenir un pronostic de performance système. Cet objectif demande de formaliser les liens entre les différents modèles pour définir des architectures capables de mettre en œuvre un pronostic système.

IV. Les architectures de pronostic système

Le pronostic système est un modèle où les évolutions futures de l'ensemble des indicateurs de dégradation et de performances de niveaux S/SS/C fournit ses résultats à un processus d'aide à la décision de maintenance, afin de lui permettre d'adapter au mieux les actions de maintenance à effectuer sur le système. Le pronostic système s'appuie sur un ensemble de modèles de natures différentes et doit exploiter leur interopération. Son bon fonctionnement repose donc sur des architectures structurant ces modèles. L'**architecture cumulée** définit une structure qui contient l'ensemble des modèles de projection des indicateurs de dégradation et qui les organise avec les modèles d'agrégation des indicateurs de performances. L'**architecture étagée** permet de structurer un ensemble de modèles de projection d'indicateurs de dégradation et de performance de niveaux S/SS/C. Ces deux architectures possèdent des avantages et des inconvénients qui aboutissent à la proposition d'architectures mixtes pour combler leurs limites respectives.

IV.1. L'architecture cumulée

IV.1.1. Modèle des performances de niveau système

Le modèle des performances de niveau système utilise l'ensemble des modèles des performances de niveau composant. Afin de les organiser, le modèle s'appuie sur l'architecture fonctionnelle du système de niveau composant représentant une chaîne de processus élémentaires supportés par des composants amont produisant les flux consommés par des processus avals. Ainsi, les indicateurs de performance d'un composant amont (représentés par les propriétés de leurs flux sortants) se

trouvent être les propriétés des flux entrants du composant aval. Pour le système à deux composants C1 et C2 représenté figure 47, on peut écrire :

$$Prop_{C1,i}{}^{flux\ sortant}(t) = Prop_{C2,i}{}^{flux\ entrant}(t), \quad i \in [0, l1] \text{ et } l1 = n2 \qquad [20]$$

Où $l1$ (resp. $n2$) représente le nombre des propriétés définies sur l'ensemble des flux sortants de C1 (resp. entrants de C2).

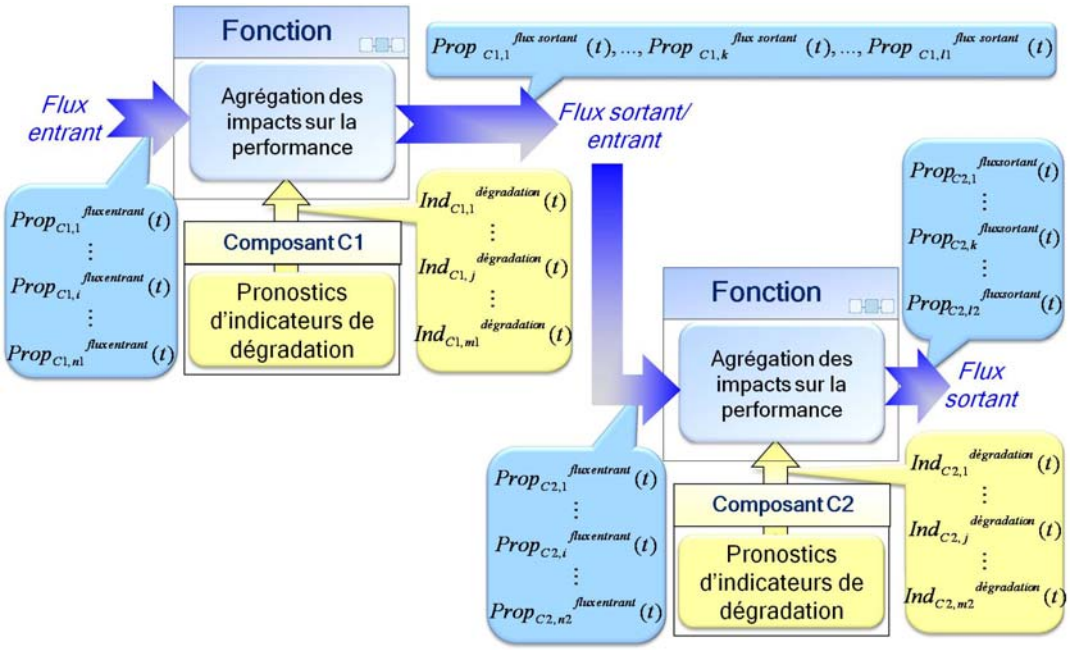


Figure 47. Modèles des performances d'un système à deux composants

Pour un système ayant plus de deux composants, la démarche reste identique. Les modèles des performances de niveau composant sont reliés par les flux de façon similaire à la chaîne formée par les processus de plus bas niveau de la chaîne fonctionnelle. Les performances à la sortie d'un composant sont impactées par la dégradation du composant considéré, et/ou les déviations des flux d'entrée répercutant les dégradations amont. Ainsi, les impacts des dégradations de chaque composant sont ajoutés à l'impact des dégradations amont au fur et à mesure que l'on chemine vers les derniers composants. Ces impacts peuvent se cumuler ou se compenser partiellement ou totalement, ce qui signifie dans ce dernier cas qu'une déviation de flux et une dégradation peuvent s'inhiber. Ces comportements posent une limite à l'utilisation de la fonction d'agrégation dans le cadre d'une vision système car l'indicateur agrégé ne contient qu'une sous-partie des informations de départ. C'est une raison supplémentaire pour démontrer la nécessité de fournir au processus d'aide à la décision les évolutions futures des performances et des dégradations qui lui permettront de déceler les effets compensés. Enfin, de part la modélisation fonctionnelle utilisée, les performances résultantes issues des derniers composants correspondent bien aux performances du système et comportent en elles les dégradations de tous les composants.

IV.1.2. Synthèse de l'architecture cumulée

Cette architecture intègre donc deux catégories de modèles : des modèles de pronostic d'indicateurs de dégradation et des modèles d'agrégation des impacts des dégradations sur les performances. Cette agrégation s'effectue de façon séquentielle en propageant les dégradations des composants

amont par les flux entrants. Ainsi les flux sortants des derniers composants qui sont également les flux sortants du système intègrent les impacts des dégradations ou défaillances de l'ensemble des composants. La méthodologie de construction est générique car elle s'appuie sur des modèles fonctionnels et des modèles dysfonctionnels (relations causales et analyses HAZOP) génériques.

Ce modèle est cependant limité par la quantité de connaissance nécessaire pour sa mise en œuvre. En effet, les modèles d'agrégation forment une chaîne en utilisant les flux. Ainsi l'absence de l'un d'eux coupe la chaîne et ne permet plus d'accéder aux dégradations de tous les composants mais uniquement d'un sous-ensemble ne reflétant donc plus les performances du système. Il est donc obligatoire d'avoir tous les maillons de la chaîne pour obtenir le résultat attendu. Il faut connaître tous les comportements de toutes les propriétés de flux et les comportements des indicateurs pour les modes de dégradation ou défaillance de chaque composant. Cette somme de connaissance est extrêmement difficile à réunir et apporte une sérieuse limitation à ce modèle.

Lorsque toute la connaissance n'est pas disponible, des solutions dégradées peuvent être envisagées afin d'obtenir une architecture cumulée, par exemple en cas de manque de connaissance dysfonctionnelle sur un composant particulier ou sur la propriété d'un flux. Dans le premier cas, un modèle n'intégrant que la connaissance fonctionnelle du composant (c'est-à-dire sans prendre en compte les modes de dégradation/défaillance) peut être construit afin d'insérer le maillon manquant et éviter de rompre le chaîne. Cette solution ne doit toutefois pas être appliquée à un composant dont l'impact sur la performance système est trop important. De même, le recours à cette solution sur un trop grand nombre de composants risque d'aboutir à des résultats de performance erronés dus à une non-prise en compte d'un trop grand nombre de sources de perte de performance. Dans le cas d'un manque de connaissance et/ou d'informations sur la propriété d'un flux, produit par un processus (e.g. nommé « A ») et consommé par un autre (e.g. nommé « B »), on peut envisager la construction d'un ensemble de règles régissant la transformation des flux entrants de A en flux sortant de B. Cela revient donc à créer un modèle d'agrégation unique faisant impacter directement sur les flux de sortie de B les pertes de performances dues aux dégradations/défaillances des composants support de A et B.

Enfin, la transmission d'un résultat au modèle suivant devrait avoir pour effet de cumuler les erreurs qui sont dues à la simplification des phénomènes et des comportements pris en compte par la modélisation et à l'absence d'informations sur les phénomènes non observés ou non observables. Le risque est d'obtenir un résultat final dont l'incertitude est trop importante, ne permettant pas d'avoir un niveau de confiance suffisant pour l'utiliser dans un processus de décision de maintenance.

Cette architecture est donc adaptée à des contextes où la connaissance est en quantité importante permettant de modéliser l'ensemble des composants et de limiter les erreurs. Elle devrait permettre ainsi d'avoir des résultats très proches de la réalité et donc de proposer des informations directement utilisables par le processus d'aide à la décision. En revanche pour des contextes où la connaissance est moins importante, une architecture telle que l'architecture étagée, présentée dans la partie suivante, est plus simple et peut permettre d'envisager également l'obtention de l'ensemble des performances et des dégradations.

IV.2. L'architecture étagée

IV.2.1. Présentation de l'architecture

L'architecture étagée est la structure la plus simple. Elle permet de projeter l'ensemble des indicateurs à obtenir pour avoir une évaluation future complète du système. À la différence de l'architecture cumulée, l'obtention des évolutions futures d'un indicateur se fait de façon indépendante des autres indicateurs car tous les pronostics de niveau S/SS/C se font en parallèle. On peut ainsi représenter ces pronostics en fonction du niveau hiérarchique (figure 48) :

- niveau composant : pronostics d'indicateurs de dégradation ou de performances de niveau composant (dans ce cas, considérés comme des symptômes de son état),
- niveau sous-système : pronostics d'indicateur de performance de niveau sous-système,
- niveau système : pronostics d'indicateur de performance de niveau système.

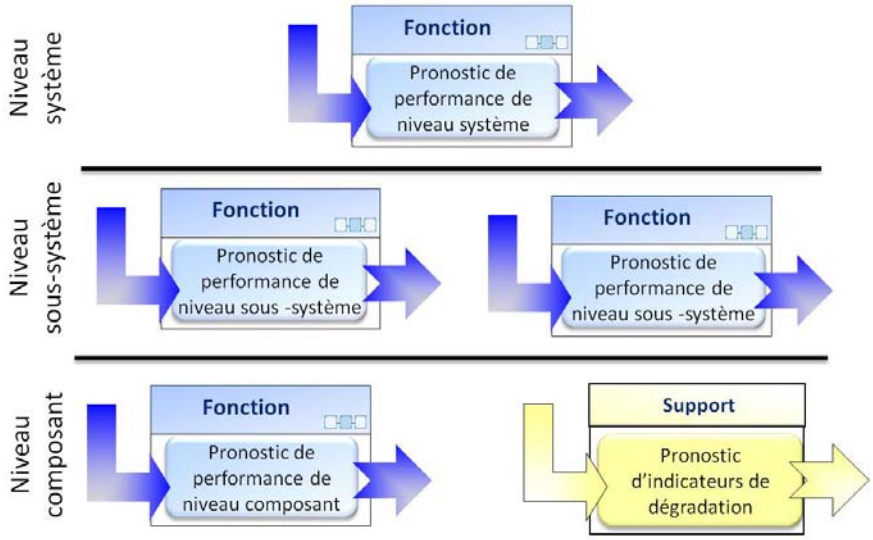


Figure 48. Architecture étagée à trois niveaux

Ces modèles appartiennent aux deux catégories de pronostics : ceux portant sur les indicateurs de dégradation qui sont de niveau composant uniquement, identiques aux modèles présentés dans le paragraphe III.1, et ceux portant sur les indicateurs de performance. Ces derniers sont des modèles de pronostic, donc conformes au modèle générique présenté au chapitre précédent (figure 49).

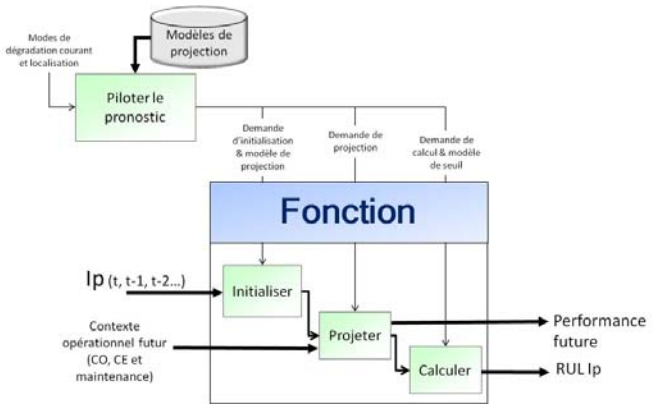


Figure 49. Structuration des pronostics de performance en sous-processus[51]

IV.2.2. Synthèse sur l'architecture étagée

Cette architecture se base sur un ensemble de pronostics réalisés en parallèle permettant bien d'obtenir l'ensemble des évolutions des dégradations et des performances nécessaires au processus d'aide à la décision. Cette indépendance des modèles a tout d'abord pour avantage de découpler leur conception et leur exécution. La conception s'affranchit de contraintes liées au besoin d'interopération avec d'autres modèles et ne dépend que de la connaissance sur l'évolution des indicateurs qui, en fonction de leur nature, permet de choisir un modèle de projection particulier. On peut noter que ces modèles peuvent fournir des résultats sous formes différentes : probabilité d'être dans un état donné (e.g. modèle fiabiliste) ou valeurs associées à une incertitude (e.g. modèle physique ou guidé par les données). La diminution du nombre de contraintes permet de faciliter la mise en œuvre de telles architectures, notamment en cas de connaissance indisponible.

L'indépendance des briques élémentaires de cette architecture devrait également limiter la propagation des erreurs. Dans le cas de l'architecture cumulée, les entrées sont issues d'autres modèles et contiennent donc les erreurs de modélisation de ceux-ci. Cela a pour résultat de propager ces erreurs dans l'évaluation du flux sortant. En revanche l'architecture étagée augmente les incertitudes et le risque d'obtenir des incohérences entre les différents résultats. L'incertitude provient du manque d'exhaustivité des comportements considérés car seul un sous-ensemble de composants, et donc une connaissance moins complète, est pris en compte. L'incohérence intervient lorsque les comportements des indicateurs de performance représentatifs d'un système ou sous-système, ne correspondent pas aux comportements des indicateurs de niveaux inférieurs. Par exemple, pour un système composé de composants en série, le système ne peut être supérieur aux RULs des composants. Ce risque d'incohérence provient des erreurs de modélisation, et notamment des erreurs inhérentes aux modèles de projection. Toutes ces erreurs de modélisation sont dues à une simplification des comportements et de la difficulté à modéliser les conditions opérationnelles/environnementales et la maintenance. Elles risquent de s'accroitre avec le niveau d'abstraction considéré car le nombre de comportements à modéliser, le nombre de facteurs influents et le nombre d'actions de maintenance envisageables à prendre en compte augmentent également.

[51] Ip : Indicateur de performance

Des apports à l'architecture étagée peuvent être envisagés afin de limiter ces difficultés. Pour cela, les niveaux des indicateurs de niveau inférieur peuvent être injectés dans les modèles de projection (figure 50). Cette solution permet de lier les niveaux hiérarchiques, ce qui limiterait les risques d'incohérence et faciliterait la prise en compte des effets des actions de maintenance à des niveaux d'abstraction élevés. Ces niveaux d'indicateurs ne doivent toutefois pas être les informations principales car cela reviendrait à réaliser un modèle d'agrégation, mais peuvent être utilisés comme des variables exogènes similaires aux conditions opérationnelles et environnementales futures.

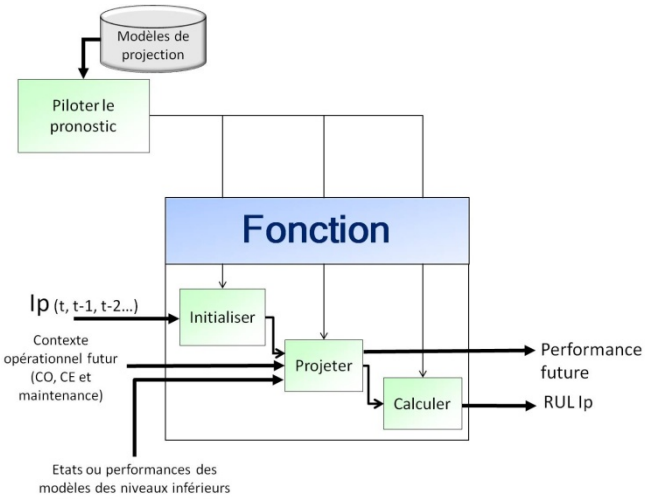


Figure 50. Structure du modèle injectant les indicateurs de niveaux inférieurs dans le modèle de projection

IV.3. Conclusion sur les architectures : vers une architecture mixte

Les deux architectures de pronostic système proposées possèdent chacune un ensemble d'avantages et d'inconvénients. Le tableau 12 synthétise les points clés évoqués précédemment.

Tableau 12. Comparaison entre les architectures

Architecture	cumulée	étagée
Quantité de connaissance nécessaire	Très importante	Peu importante
Exhaustivité des comportements	Bonne	Mauvaise
Cohérence des résultats	Très bonne	Très mauvaise

L'architecture cumulée a pour principal inconvénient la quantité de connaissance nécessaire à sa mise en œuvre, qui est également la principale qualité de l'architecture étagée. En revanche l'architecture cumulée permet d'assurer une certaine exhaustivité des comportements à modéliser et surtout une très bonne cohérence à la différence de l'autre architecture déficiente sur ces critères. L'objectif doit être de mettre en place une architecture cumulée quand la connaissance suffisante est disponible. De façon générale, cette connaissance cible uniquement des parties du système (sous-systèmes ou composants) qui sont critiques ou des sous-systèmes/composants très classiques dans le monde industriel, e.g. roulements, engrenages, moteurs électriques… Ainsi les pronostics de leurs indicateurs peuvent être réalisés par des architectures cumulées insérées au sein d'une architecture étagée permettant de modéliser le système de façon plus globale en prenant en compte l'ensemble des parties restantes du système.

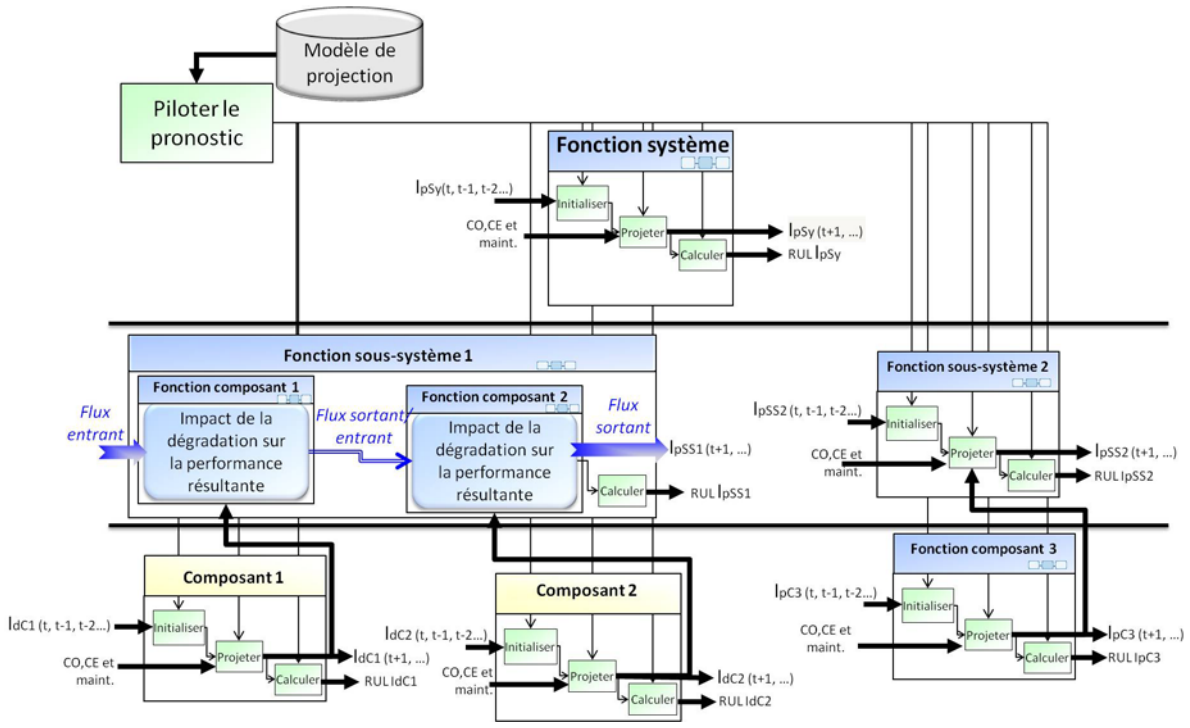


Figure 51. Exemple d'architecture mixte

Un exemple d'architecture mixte est proposé sur la figure 51. Ce système est composé de deux sous-système SS1 et SS2. Le sous-système SS1 est lui-même composé de deux composants C1 et C2 et son pronostic se base sur une architecture cumulée. Le sous-système SS2 est composé de multiples composants dont seul le composant C3 est significatif. Ainsi cette partie est pronostiquée avec une architecture étagée de pronostic d'indicateurs de performance sous-système et composant. De plus, le modèle de projection de SS2 s'appuie sur le pronostic d'indicateur de performance du composant C3. Enfin le niveau système est pronostiqué par une architecture étagée.

Cet exemple montre bien la complexité de la réalisation d'un pronostic système par la quantité de modèles de pronostic ou d'agrégation à construire mais aussi par le nombre de relations entre eux, ce qui engendre des contraintes dans la phase de modélisation. Le concepteur doit donc faire face à une quantité d'informations et connaissance importante et pouvant être sous des formes non adaptées à leur utilisation. Ceci rend particulièrement cruciale la phase de sélection des indicateurs à pronostiquer et de leur modèle afin de ne pas construire de modèles superflus non pertinents. Ainsi, nous proposons dans la partie suivante une méthodologie permettant de guider le concepteur dans cette démarche.

V. Méthodologie pour l'ingénierie du pronostic système

Les nouvelles démarches de soutien logistique intégré présentées au chapitre 1 font de l'ingénierie du pronostic système une partie intégrante du couplage des conceptions du système principal et du système de maintenance. Le concepteur du pronostic système devrait définir au plus tôt les éléments qui lui seront nécessaires afin de pouvoir éventuellement orienter certaines décisions de conception sur le système principal pour améliorer sa capacité à être pronostiqué (« pronosticabilité ») ou d'accepter la solution du système principal retenue vis-à-vis de ces contraintes. Or le pronostic

système se construit sur la base du choix des indicateurs à pronostiquer et des modèles associés faisant d'eux les éléments nécessaires évoqués précédemment.

Ainsi Uckun (Uckun *et al.*, 2008) fait la constatation que le déploiement du pronostic est principalement orienté construction de l'outil de projection sans généricité. Il est toutefois à noter que ces problématiques d'ingénierie commencent à être traitées : Walker et Kapadia (Walker et Kapadia, 2009) proposent une méthodologie détaillée qui s'appuie également sur des analyses de type AMDEC, les auteurs de (Mathew *et al.*, 2008) proposent une méthodologie de construction des pronostics pour des matériels électroniques en se basant sur une modification de la méthode AMDEC appelée FMMEA (Failure modes, mechanisms and effects analysis[52]) et Kramer et Tumer (Kramer et Tumer, 2009) utilisent des modèles StateChart permettant d'obtenir un modèle dysfonctionnel sous forme graphique pour déterminer les capteurs et proposer une architecture globale du pronostic. Ces derniers se basent sur la méthode FFIP (Functionnal failure identification and propogation[53]) qui permet de propager les défaillances fonctionnelles et leurs impacts sur les flux mais sans considérer les dégradations (Kurtoglu et Tumer, 2007).

En synthèse, ces travaux sur l'ingénierie s'intéressent spécifiquement aux défaillances des composants et du système, mais n'intègrent pas de vision dégradation nécessaire à l'obtention de performances de niveaux S/SS/C. C'est pourquoi nous proposons une méthodologie permettant de guider le concepteur dans cette phase.

La phase de conception du pronostic doit sélectionner les modes de dégradation/défaillance et déviations les plus importants par rapport à différents critères (fréquence d'occurrence, impact sur la performance, coûts engendrés par l'action de maintenance…), définir l'ensemble des indicateurs pouvant observer ces modes et déviations, construire avec la connaissance disponible les modèles pour projeter ou calculer ces indicateurs… Elle doit permettre de prendre des décisions (sélection, modélisation…) sur des phénomènes complexes (dégradation, perte de performance) non-indépendants. Cette complexité engendre des besoins méthodologiques auxquels ce travail s'intéresse. Une première proposition (figure 52) permet d'énoncer les étapes successives à réaliser aboutissant au choix des indicateurs et des modèles associés.

[52] Analyses de modes de défaillances, de leurs mécanismes et de leurs effets

[53] Identification des défaillances fonctionnelles et de leurs propagations

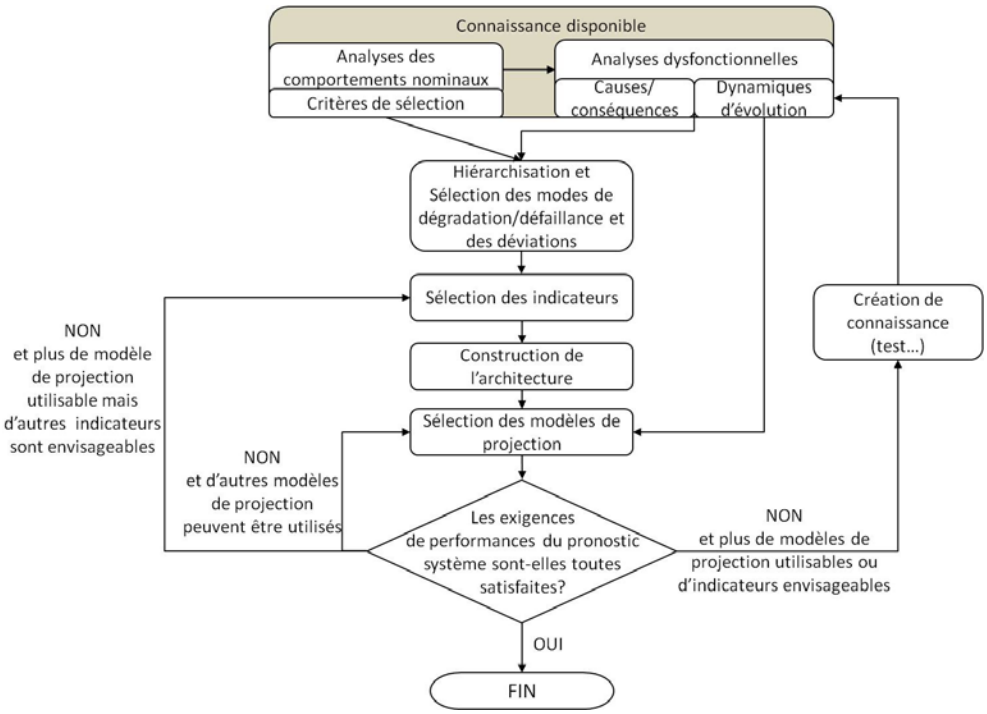


Figure 52. Méthodologie proposée de sélection des indicateurs et de leur modèle de projection associé

V.1. Analyses des comportements nominaux

L'analyse des comportements nominaux permet de décrire ce qui est attendu de la part du système. Ils sont dépendants d'un grand nombre de facteurs visibles sous différents points de vue décrits par différents modèles ou méthodes de description. Le point de vue fonctionnel reste le point de vue principal car il détaille les missions du système à l'aide d'analyses fonctionnelles (SADT, FAST, SySML…). Cette analyse des comportements nominaux fournit les informations de base pour les analyses dysfonctionnelles mais permet également de définir un critère de sélection des indicateurs à pronostiquer. En ce sens, d'autres points de vue pourraient être utilisés :

- point de vue environnement du système : description de l'environnement du système et de leurs interactions.
- point de vue opérationnel : modèles permettant de décrire l'utilisation du système (e.g. cas d'utilisation sysML) pouvant aboutir à l'énoncé des modes de marche du système.
- point de vue organique : description de l'architecture du système (du système aux composants : e.g. diagramme de blocs sysML, fonction de structure, modèle numérique 3D (e.g. modèles CAO)) permettant de décrire la décomposition physique du système.
- point de vue technique : description des technologies et de la constitution physique des composants.
- point de vue financier : ensemble des coûts associés aux composantes du système, politique et stratégies de gestion de la vie du système.

Les critères de sélection peuvent concerner l'occurrence des modes de dégradation/défaillance et déviations (fréquence d'apparition, risque de non-détection) ou leurs conséquences comme la gravité (impact sur l'environnement, sur les performances du système…) ou l'ensemble des coûts occasionnés : indisponibilité, coût de la maintenance direct ou indirect, coût des dégradations

portées sur l'environnement et engendrées par la défaillance (dégradation de système/composants à proximité, pollution…). Ce choix s'effectue en fonction du domaine d'application et des choix stratégiques de maintenance, eux-mêmes issus de la stratégie d'entreprise.

V.2. Analyses dysfonctionnelles

Ces analyses permettent d'extraire la connaissance sur les comportements non attendus. Ces connaissances sont présentées sous deux catégories possibles : celle décrivant les causes et conséquences d'un comportement anormal de tout ou partie du système, et celle décrivant les apparitions et les évolutions de ces comportements dynamiques. La première catégorie repose sur un grand nombre d'analyses génériques (AMDEC, HAZOP, arbres de causes et défaillances…) ou plus spécifiques (FMMEA ou FFIP présentées précédemment). La seconde catégorie est extraite d'analyses effectuées sur des ensembles de données et/ou de retour d'expert. Cette catégorie contient des connaissances de nature différente :

- valeur d'un indicateur (associée à une incertitude ou une imprécision) ou probabilité d'être dans un état,
- quantitative ou qualitative,
- continue ou discrète.

Ces deux catégories permettent de fournir la connaissance suffisante pour, dans un premier temps choisir les indicateurs et, dans un second temps, choisir et paramétrer les modèles de projection ou d'agrégation. La première étape nécessite une vision globale et synthétique de l'ensemble des connaissances dysfonctionnelles. Ces connaissances retranscrites au sein d'une table donnent au concepteur cette vue générale mais aucune méthode de ce type ne propose de rassembler l'ensemble de la connaissance nécessaire pour le pronostic. Aussi nous proposons l'AD^{3}P (Analyse des dégradations, défaillances et déviations pour le pronostic) qui formalise la connaissance sous forme d'un tableau constitué de sept champs (tableau 13).

Tableau 13. Tableau AD^{3}P

Mode de dégradation/ défaillance et déviation	Causes	Conséquences	Niveau des critères de sélection	Variables influentes	Indicateurs d'observation	Comportements observables

Les trois premiers champs (*mode de dégradation/défaillance et déviation*, *Causes* et *Conséquences*) sont directement issus des études AMDEC (pour les modes) et HAZOP (pour les déviations). Le champ *Niveau des critères de sélection* permet d'évaluer chaque mode ou déviation en fonction des critères de sélection définis à partir de la connaissance du système (*cf* § V.1). Cette évaluation peut être quantitative (e.g. 0,3 défaillance par jour, 500 euros par minute d'indisponibilité,…) ou qualitative (e.g. important, moyen, faible…). Le champ *Variables influentes* permet de recenser les variables exogènes qui influencent les dynamiques d'apparitions et d'évolutions d'un mode de dégradation/défaillance ou d'une déviation. Ces variables sont issues du contexte d'utilisation

(variables opérationnelles et environnementales) mais également, pour le niveau composants, de paramètres spécifiques du matériau ou de la technologie par exemple.

Le champ *Indicateurs d'observation* établit les indicateurs qui permettent d'observer le mode de dégradation/défaillance ou la déviation considéré. Ce sont ces indicateurs qui seront projetés ou calculés. Enfin, pour chaque indicateur recensé, le champ *Comportements observables* permet de décrire le comportement de l'indicateur suite à l'occurrence d'une défaillance ou en fonction de l'évolution d'une dégradation (aboutissant éventuellement à la défaillance). Le pronostic doit prévoir une dégradation/défaillance suffisamment tôt afin de réaliser l'ensemble des activités situées entre l'établissement d'un résultat de pronostic et la réalisation de l'action de maintenance déclenchée (prise de décision, acheminement des matériels nécessaires, préparation de l'action…). L'évolution d'une dégradation ou l'occurrence d'une défaillance étant plus ou moins rapide, la connaissance sur la dynamique d'évolution peut ainsi être une information importante dans le choix des indicateurs.

V.3. Hiérarchisation et sélection des modes de dégradation/défaillance et des déviations

Cette étape a pour but de choisir les modes de dégradation/défaillance et les déviations dont les évolutions futures doivent être évaluées. En premier lieu les résultats de l'AD^{3}P sont utilisés à travers la colonne *Niveau des critères de sélection*. Il est toutefois nécessaire de vérifier que le mode ou la déviation sont observables (c'est-à-dire qu'il existe au moins un indicateur dans la colonne *Indicateurs d'observation*) et pronosticable (dynamique d'évolution compatible avec un pronostic et une décision de maintenance). Dans le cas contraire, le pronostic des causes de ce mode ou déviation doit être investigué et étudié de façon similaire. L'objectif est de pronostiquer ces causes puis de créer une fonction d'agrégation permettant par calcul d'évaluer le mode ou déviation initial. Dans le cas où cela n'est pas possible, le concepteur du pronostic doit proposer d'accepter l'occurrence de la défaillance ou de modifier la conception du système par l'ajout de capteurs et/ou par la reconception d'une ou plusieurs partie(s) du système (pour le contexte de soutien logistique intégré).

V.4. Sélection des indicateurs

Elle découle directement des choix effectués dans l'étape précédente. Toutefois, dans le cas où plusieurs indicateurs permettent d'observer un même mode ou déviation, un choix doit être effectué. La préférence doit aller aux indicateurs ayant une plus grande facilité de construction des modèles mais également aux indicateurs communs au pilotage du système.

V.5. Construction de l'architecture

L'étape précédente a permis d'établir l'ensemble des indicateurs de dégradation et de performance à pronostiquer. Les indicateurs de performance de niveau S/SS/C peuvent soit être calculés (architecture cumulée) soit projetés (architecture étagée). L'architecture cumulée est choisie lorsque l'ensemble des dégradations/défaillances qui impacte l'indicateur considéré est également pronostiqué à travers leurs indicateurs de dégradation. L'utilisation d'arbres de causes permet de faciliter le travail du concepteur lui permettant d'avoir une vision graphique des relations causes/conséquences. Dans le cas où des modes de dégradation/défaillance ne sont pas traités, l'architecture étagée est utilisée.

V.6. Sélection des modèles de projection

Le choix d'un modèle de projection s'effectue en fonction de la connaissance disponible sur sa propre dynamique d'évolution et ses comportements observables. La source de la connaissance (expertise et/ou données), la quantité (principalement pour les données) et leur contenu, de même que les comportements observables qui peuvent être linéaires ou non, permettent d'orienter le concepteur dans son choix. Pour cette étape, les classifications des modèles de projection présentées au chapitre précédent peuvent guider le concepteur.

V.7. Vérification des performances du pronostic système

Cette phase doit permettre de vérifier le respect de l'ensemble des exigences du pronostic système. Si la réponse à cette étape est négative, alors le pronostic système doit être modifié. Ces modifications portent sur les modèles de projection les moins performants. Si ces modifications ne suffisent pas, alors l'utilisation de nouveaux indicateurs doit être proposée. Enfin, si aucune configuration ne permet de respecter les exigences, le concepteur du pronostic peut demander la réalisation d'essais jusqu'à la défaillance, permettant d'augmenter la quantité de connaissance sur l'évolution des dégradations, ou demander une modification de la conception par ajout de capteurs ou par reconception de partie du système (contexte de soutien intégré). Enfin, cette phase de vérification devrait faire appel à une phase de validation qui ne peut être faite qu'en exploitation du pronostic.

VI. Conclusion

La recherche d'un pronostic système générique demande de s'appuyer sur des bases communes à l'ensemble des besoins industriels dont l'objectif est de pronostiquer l'ensemble des indicateurs de dégradation et de performance qui sont représentatifs d'un mode de dégradation/défaillance d'un composant ou de la déviation d'un flux d'un processus de niveau S/SS/C. Pour atteindre cet objectif, le pronostic système repose sur des architectures qui permettent d'organiser des modèles jouant le rôle de briques ou d'atomes soit pour projeter un indicateur (de dégradation ou de performance) soit pour déduire son évolution future à partir de résultats de modèles de projection (modèles d'agrégation pour les indicateurs de performance). Deux architectures ont fait l'objet de présentations spécifiques :

- l'architecture cumulée qui projette les indicateurs de dégradation puis calcule avec des modèles d'agrégation les indicateurs de performance,
- l'architecture étagée qui projette l'ensemble des indicateurs de façon indépendante.

Les architectures mixtes permettent de profiter des avantages des deux architectures de départ tout en cherchant à combler leurs limites. L'application à un système particulier fait l'objet d'une proposition de méthodologie de construction qui guide le concepteur dans la sélection des indicateurs, l'établissement de l'architecture et le choix des modèles de projection pour les indicateurs concernés. Les indicateurs calculés sont obtenus par des modèles d'agrégation qui consistent en une instanciation de relations génériques par de la connaissance experte issue d'une analyse HAZOP, supportée par un outil neuro-flou.

Le chapitre suivant porte sur la mise en œuvre des propositions faites dans ce chapitre sur un système réel. Ce cas d'application est extrait d'une plateforme d'enseignement et de recherche. L'objectif et de montrer la faisabilité de la méthode proposée ici et d'établir un premier bilan en termes de valeur ajoutée et de limites.

Chapitre 4 : Application à la plateforme TELMA

I. Introduction

Le chapitre précédent a fait l'objet de la description d'une méthodologie d'ingénierie du pronostic système. Afin de valider la démarche entreprise, nous l'appliquons sur un système proche de la réalité industrielle actuelle en matière de technologies, de complexité ou d'intégration matérielle et logicielle… En ce sens, nous proposons dans ce chapitre la mise en œuvre de cette ingénierie sur un sous-ensemble du système de Déroulement/Presse de la plateforme d'expérimentation TELMA (TÉLéMAintenance).

Nous proposons de construire le processus de pronostic sur ce système complexe réel (multi-composants, multi-états soumis à des interactions multiples), suivant la procédure définie au chapitre précédent :

- Formalisation des connaissances fonctionnelles et dysfonctionnelles par des analyses AMDEC et HAZOP complétées dans le cadre d'une étude AD^3P,
- Sélection des indicateurs à pronostiquer, de l'architecture de pronostic système et des modèles de projection associés aux indicateurs,
- Construction des modèles de projection à l'aide de la connaissance disponible et création des modèles d'agrégation par le paramétrage des ANFIS.

Le processus de pronostic est ensuite mis en œuvre sur le procédé physique réel avec des ressources logicielles et matérielles concrètes permettant ainsi de montrer la faisabilité de la méthodologie sur une architecture opérationnelle particulière. Enfin, la dernière partie du chapitre est consacrée à l'analyse préliminaire de la validité des résultats fournis par le processus de pronostic.

II. Présentation de la plateforme TELMA

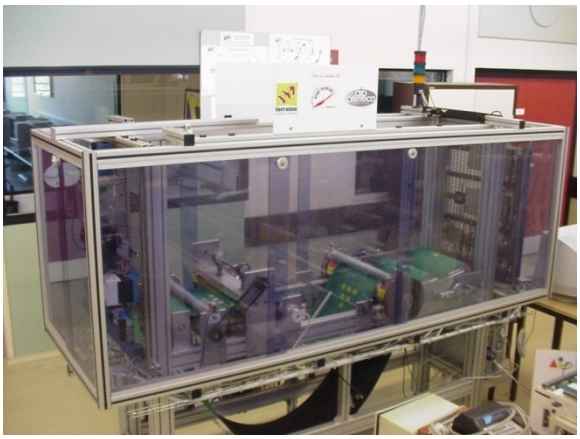
La plateforme d'intégration en télémaintenance TELMA (TÉLéMAintenance) du pôle AIP-PRIMECA Lorraine (Pôle de Ressources Informatiques pour la MÉCAnique de l'Atelier Inter-établissement de Productique) est une plateforme pédagogique ouverte sur l'extérieur[54]. C'est également une ressource pour la recherche en relation avec les nouveaux besoins exprimés par les entreprises, notamment dans les domaines de la maintenance, de la sûreté de fonctionnement et de la qualité, liés au développement des technologies de l'information et de la communication. Ainsi, sa vocation est de mettre en avant l'efficacité des organisations modernes et des nouveaux outils de maintenance (maintenance prévisionnelle, maintenance collaborative, maintenance opportuniste, *e*-maintenance, pronostic…) et leur impact sur la disponibilité, les coûts et la qualité de fabrication d'un système de production. Elle est utilisée comme support de validation pour les travaux effectués au CRAN qui concernent ces problématiques. TELMA a été notamment utilisée dans le cadre du projet européen DYNAMITE[55] (Dynamic decision in maintenance) pour expérimenter et valider des composants, ainsi que dans le projet européen IMaPla.

La plateforme TELMA (figure 53) est constituée de deux systèmes superposés : un premier système permettant de simuler un système de presse/poinçonnage inspiré de systèmes industriels et un

[54] La plateforme est accessible à distance par le Web à tout moment, elle fonctionne 24h/24h et 7jours/7 sans personnel spécialisé, ni encadrement à proximité. Une Webcam permet à l'utilisateur de visualiser la plateforme en fonctionnement. Elle est localisée à l'Université Henri Poincaré, Nancy Université.

[55] http://dynamite.vtt.fi/index.htm

second système permettant de créer des symptômes de dégradations/défaillances du premier système. Ces deux systèmes sont indépendants au sens où leurs parties commande et opérative sont physiquement découplées (supportées par des composants distincts).



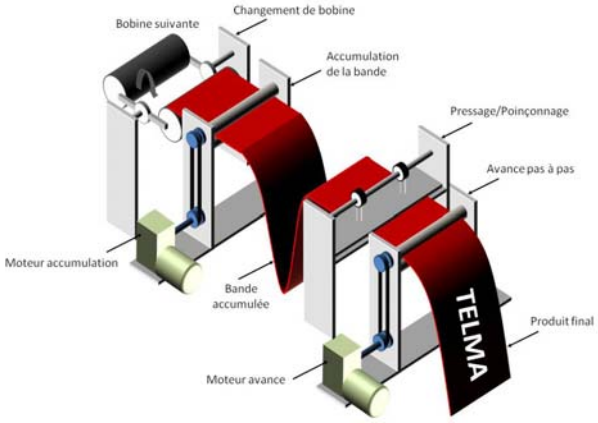


Figure 53. La plateforme TELMA (vue réelle et schématique)

II.1. Description du système de presse/poinçonnage

La plateforme TELMA permet de simuler le déroulement d'un produit présenté sous la forme de rouleaux de matière première que l'on déroule en une bande, servant une presse verticale. Ce type de système est particulièrement présent dans l'industrie lorraine (sidérurgie, papeterie, imprimerie…). Un tel système est utilisé par exemple chez PSA Peugeot Citroën pour l'emboutissage de tôles. Une présentation approfondie de la plateforme TELMA est disponible dans (Levrat et Iung, 2007) et (Levrat *et al.*, 2008). De la documentation supplémentaire est également disponible à l'adresse suivante : http://aip-primeca.net/lorraine/intranetpedagogique/documentation.asp

II.1.1. La partie opérative du processus de presse/poinçonnage

La partie opérative est découplée en quatre sous-systèmes (figure 54) :

- Changer la bobine : ce sous-système permet l'alimentation de produit simulée en entrée par un système automatisé de changement de bobines, constitué d'un barillet supportant deux bobines.
- Accumuler la bande : il achemine le produit en entrée de la presse en assurant une tension constante dans la portion de bande située en sortie de bobine afin d'éliminer les risques de déchirement du produit, en aplanissant cette bande et en alimentant en produit une zone tampon. Cette zone joue le rôle de stock de bande déroulée (nommée bande accumulée), contrôlée par un capteur[56], et permet de découpler les évolutions des deux premiers sous-systèmes et des deux derniers.
- Avancer la bande : ce sous-système permet d'amener sous la presse le produit en respectant des exigences strictes sur son positionnement. Cela signifie qu'il crée un mouvement linéaire discontinu sur le produit, consommant ainsi la bande accumulée dans la zone tampon. Ce système fournit également le mouvement et la puissance mécanique nécessaire pour l'animation du poinçon de la presse.
- Presser la bande : ce sous-système simule l'opération de transformation (presse/poinçonnage) sur la bande permettant d'obtenir le produit final. Le mouvement alternatif du poinçon est synchronisé mécaniquement avec le mouvement discontinu de la

[56] Pantin

bande créé par le sous-système d'avance. Cela permet d'avoir une bande immobile au moment du pressage proprement dit et qui se remet en mouvement une fois l'opération terminée. Sur TELMA, ce sous-système est physiquement situé en amont du sous-système d'avance. En revanche, d'un point de vue fonctionnel, il se situe en aval (figure 55).

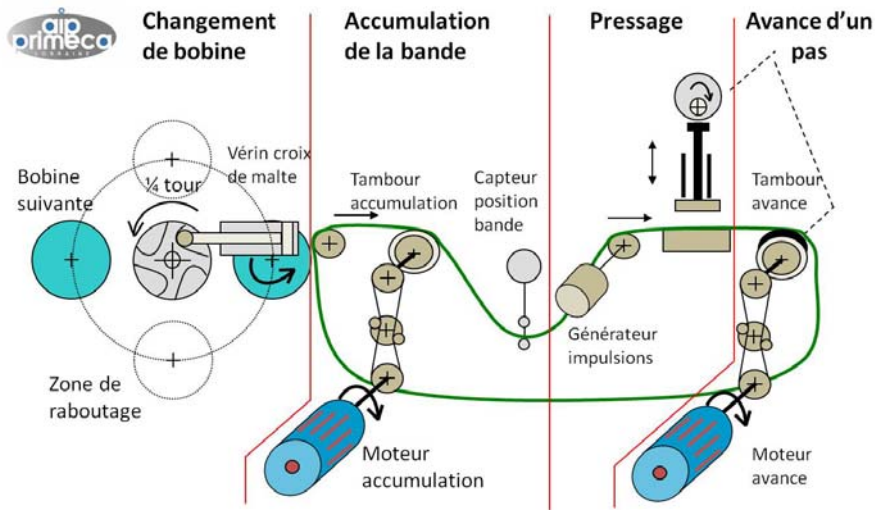


Figure 54. Les quatre sous-systèmes de la partie opérative du processus de presse/poinçonnage

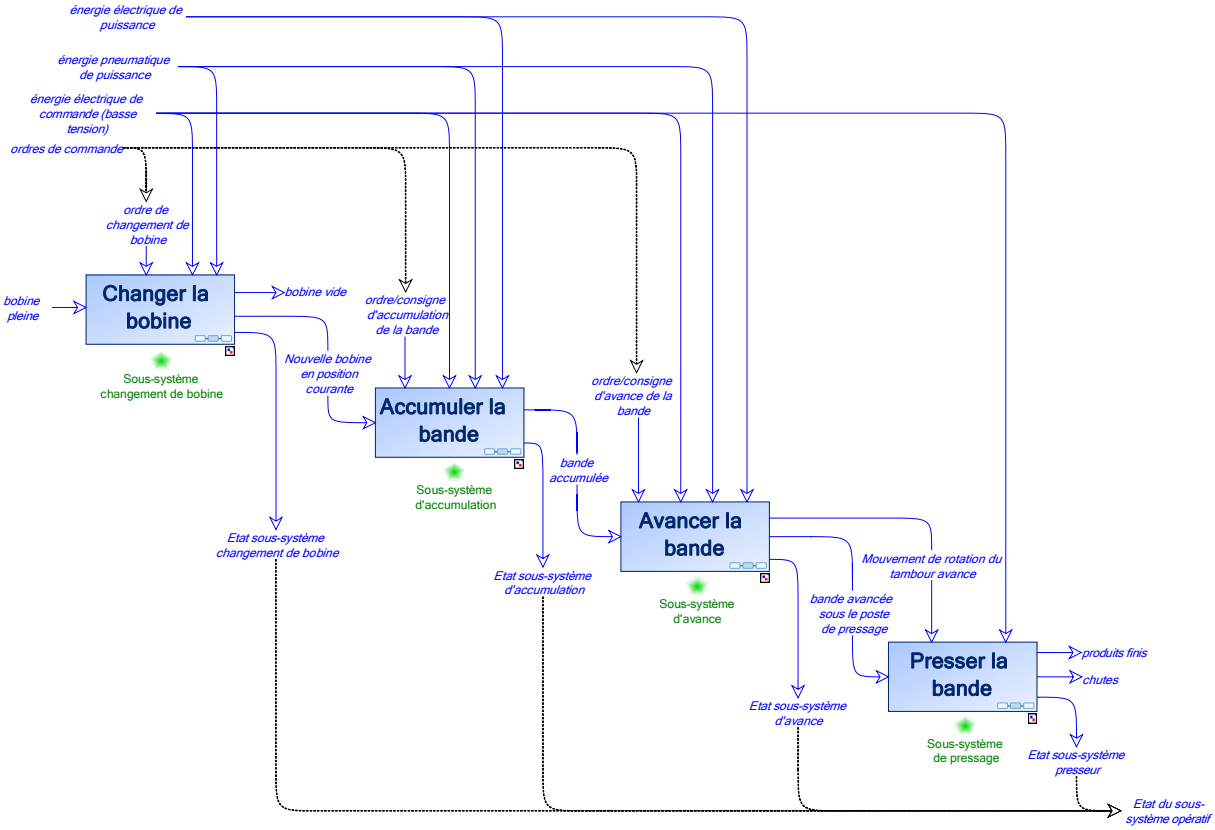


Figure 55. Décomposition fonctionnelle de TELMA

II.1.2. La partie commande du processus

Les ressources de la plateforme TELMA sont pilotées et synchronisées par des processus d'automatisation communiquant par réseaux de terrain (Ethernet Industriel), ouverts vers le niveau

Entreprise (Ethernet AIP - Intranet) et son environnement (Internet). Les différents pré-actionneurs, capteurs, pupitre d'Interface Homme-Machine, Webcam, Automates Web de la plateforme sont reliés à un poste local de supervision qui permet d'accéder aux configurations des composants (programmes, paramètres de fonctionnement) ainsi qu'à leur états et à leur valeurs courants (figure 56). *Via* un serveur OPC[57], ces informations sont mises à disposition d'un système de gestion de configuration de matériel et d'un serveur Web qui ouvre l'architecture vers le réseau Internet.

L'installation est constituée d'un automate programmable industriel (API) qui assure le contrôle-commande du processus. Un module d'entrées/sorties déporté permet le contrôle des énergies (pneumatique et électrique), des balises lumineuses (qui reflètent l'état de la plateforme) du pupitre, et du sous-ensemble « Changement de bobine ». Deux variateurs de vitesse permettent de piloter les moteurs qui acheminent le produit.

Deux modes d'utilisation sont possibles : le mode Local (qui est prioritaire), et le mode Distant. En mode Local, l'écran tactile Magélis permet d'interagir avec la plateforme TELMA. Dans ce mode, la mise en production est gérée *via* l'écran tactile. Dans le mode Distant, la production est gérée à travers un accès *via* internet de la supervision. De plus, une caméra Web pilotable permet de visualiser à distance et à tout moment le système en fonctionnement.

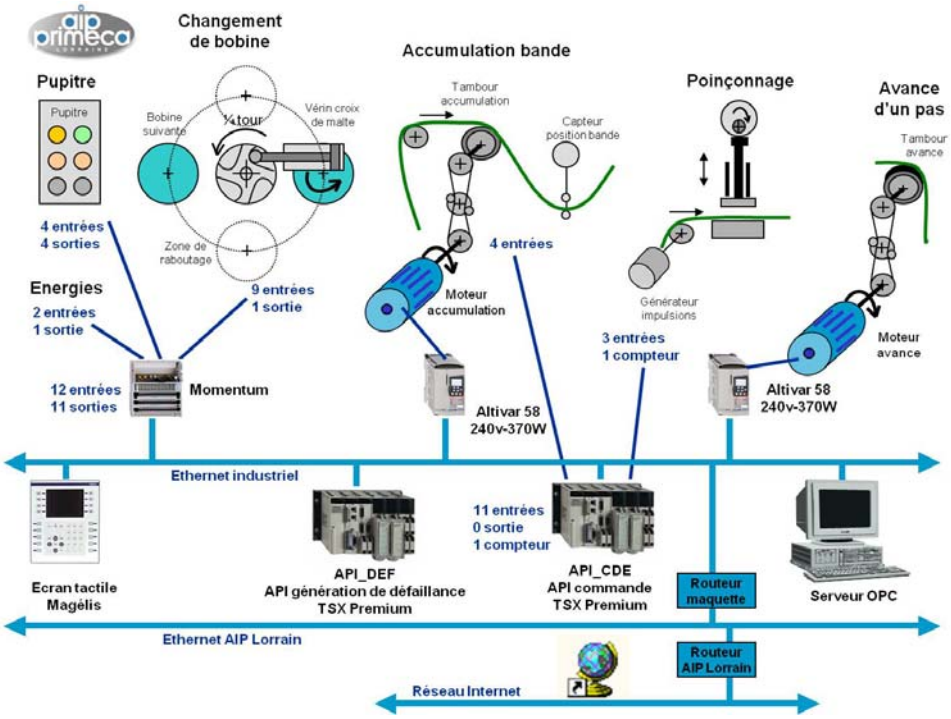


Figure 56. Architecture de commande de la plateforme TELMA

II.2. Description du système de simulation des dégradations/défaillances

Le système de simulation des dégradations/défaillances est composé d'un ensemble de composants indépendants et commandés par un API dédié (nommé API_DEF sur la figure 56). L'utilisation de

[57] OLE for Process Control

l'écran tactile ou de la supervision permet de définir les paramètres voulus pour la génération de dégradations/défaillances.

Les composants de ce système peuvent être classés en deux catégories : génération de défaillances de la partie commande du processus de presse/poinçonnage et génération de dégradations/défaillance de la partie opérative. Le premier type est supporté par des modules permettant de modifier les entrées et sorties de l'API de commande (figure 57a). Chaque module permet de forcer à 0 ou à 1 une entrée pour forcer la valeur d'un capteur, ou d'une sortie pour forcer l'ordre émis pour un actionneur.

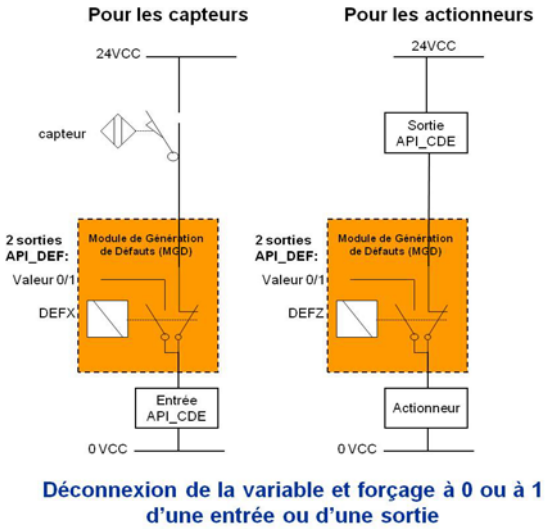


Figure 57a. Module de génération de défaillance de la partie commande

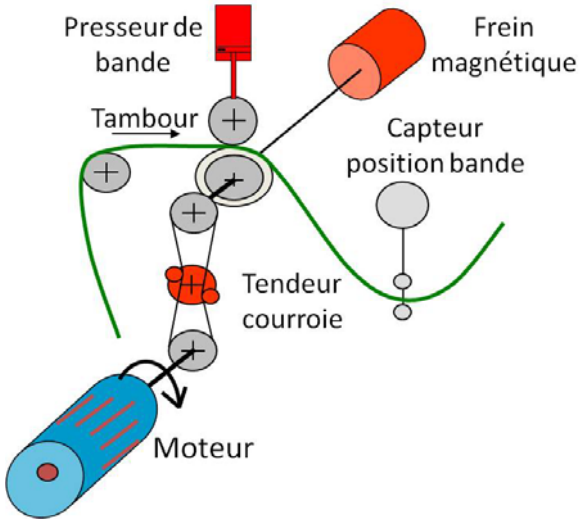


Figure 57b. Composant simulant les modes de dégradation/défaillance sur la partie opérative

Le second type est constitué d'un ensemble de composants directement implantés sur la partie opérative (figure 57b), et plus spécifiquement sur les sous-systèmes d'avance et d'accumulation, simulant soit des dégradations (évolution continue et progressive d'un symptôme jusqu'à la défaillance) soit des défaillances (apparition soudaine et totale du mode de défaillance). Les dégradations sont réalisées par deux freins magnétiques situés en bout d'arbre des effecteurs des sous-systèmes. Ils permettent de simuler des modes de dégradation comme la dégradation des éléments des moteurs qui guident en rotation (e.g. palier), la dégradation des roulements ou de provoquer des glissements plus importants au niveau des contacts poulies/courroie. Les modes de défaillance de type tout ou rien sont réalisés, pour chaque poste d'accumulation et d'avance, par deux vérins : l'un linéaire (presseur de bande) qui permet d'exercer un effort presseur sur la bande permettant de la mouvoir, l'autre rotatif (tendeur courroie) permettant d'augmenter le chemin parcouru par la courroie et ainsi de la tendre. Le premier permet de simuler une perte d'adhérence sur la bande et le second la rupture ou la détente de la courroie.

II.3. Description du système de surveillance

Le système de surveillance est supporté par le progiciel CASIP[58] (*Computer-Aided Safety and Industrial Productivity)*. CASIP est architecturé autour d'une base de connaissances de maintenance, ce qui garantit la cohérence et permet la réutilisation des analyses, des données et des travaux

[58] Produit commercialisé par la société Predict (www.predict.fr)

effectués, ainsi qu'une ouverture aisée vers des systèmes d'information dans l'entreprise (ERP, MES ou GMAO). Autour de cette base se trouvent différents modules :

- des modules d'ingénierie de la maintenance (AMDEC, HAZOP, DIAG) permettant de mettre en œuvre des méthodes aboutissant à la sélection d'indicateurs à surveiller en fonction des modes de défaillance et déviations identifiés comme critiques.
- un module de suivi des dérives de fonctionnement, de détection des défaillances, de surveillance, de diagnostic (SAM) permettant d'acquérir les données provenant du système et de les enregistrer dans une base de données. SAM possède une base de données temps réel, et communique avec le serveur OPC pour accéder aux données (variables automates) de la plateforme.
- un module de traitement des données historisées et de création de connaissance (KASEM[59]) permettant de créer et tester de nouveaux indicateurs, alarmes, alertes… sur des données contenues dans une base de données (alimentée par le module SAM).

III.Description du cas d'application

Afin de montrer la faisabilité de la méthodologie proposée, aussi bien d'un point de vue "construction des modèles" que d'un point de vue "implantation du processus sur une architecture opérationnelle", nous allons développer puis mettre en œuvre le processus de pronostic sur les sous-systèmes d'avance et de presse de la bande.

III.1. Analyse fonctionnelle

Avant de pouvoir appliquer la méthode à ce cas d'étude, des analyses fonctionnelle et dysfonctionnelle ont été menées. L'analyse fonctionnelle de niveau système est décrite sur la figure 58. Elle constitue une portion de la plateforme TELMA, qui se décompose en deux sous-systèmes principaux : les systèmes d'avance et de presse (figure 59). D'un point de vue organique, ce système est structuré selon trois niveaux : système, sous-système et composant, représentés sur la figure 60.

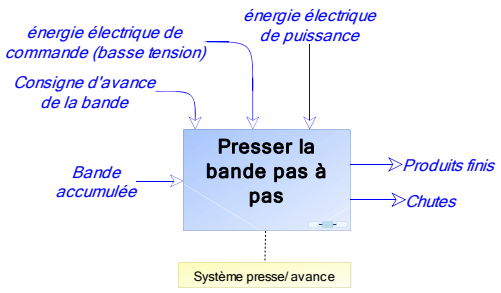


Figure 58. Analyse fonctionnelle de niveau système

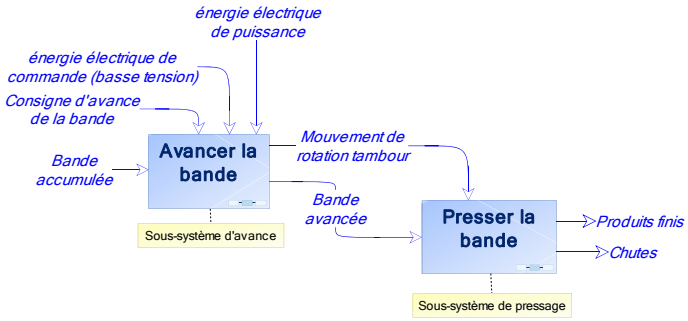


Figure 59. Analyse fonctionnelle de niveau sous-système

[59] Knowledge and Advanced Services for E-Maintenance

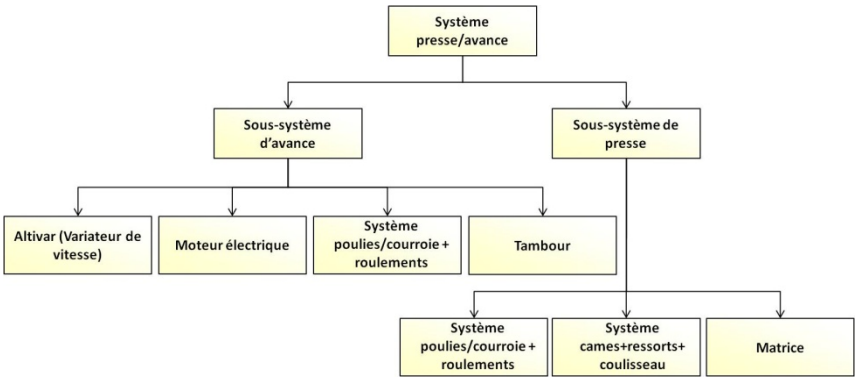


Figure 60. Architecture organique du système de presse/avance

D'un point de vue fonctionnel, les deux fonctions de niveau sous-système sont également décomposables au niveau composant. La fonction d'avance se décompose en quatre fonctions de niveau composant supportées par les quatre équipements considérés dans cette étude constituant une chaîne cinématique (figure 61) :

- le variateur de vitesse (nommé altivar) est un pré-actionneur adaptant l'énergie de puissance à fournir au moteur (flux « énergie électrique adaptée ») aux consignes provenant de la partie commande (flux « consignes d'avance de la bande »). La partie électronique de ce composant nécessite une alimentation électrique pour fonctionner (flux « énergie électrique de commande (basse tension) »).
- le moteur est l'actionneur et transforme le flux électrique fourni par l'altivar en énergie mécanique (flux « mouvement de rotation moteur »).
- L'ensemble système poulies/courroie + roulements permet de transmettre au tambour l'énergie mécanique fournie par le moteur et d'assurer dans l'espace la mise en position de l'arbre du tambour et d'un ensemble d'éléments situés sur celui-ci (poulie menée d'avance, tambour, poulie meneuse de pressage). Il n'agit donc pas sur les propriétés du mouvement de rotation (le rapport de réduction des poulies est de 1), ne modifiant idéalement que sa position dans l'espace. Le flux obtenu « mouvement de rotation tambour » est transmis au tambour et au sous-système de pressage. En ce sens, il représente un flux de sortie du sous-système d'avance.
- les tambours meneur et mené sont les effecteurs et agissent donc directement sur le flux principal entrant (flux « bande accumulée ») pour obtenir le flux principal sortant (« bande avancée »). Le caractère intermittent du mouvement donné à la bande est créé par la géométrie du tambour meneur qui entraîne la bande sur un demi-tour uniquement et laisse glisser la bande pendant le demi-tour restant (période de pressage de la bande). Le tambour mené, grâce à des vérins, plaque la bande sur le tambour meneur pendant le demi-tour d'entraînement

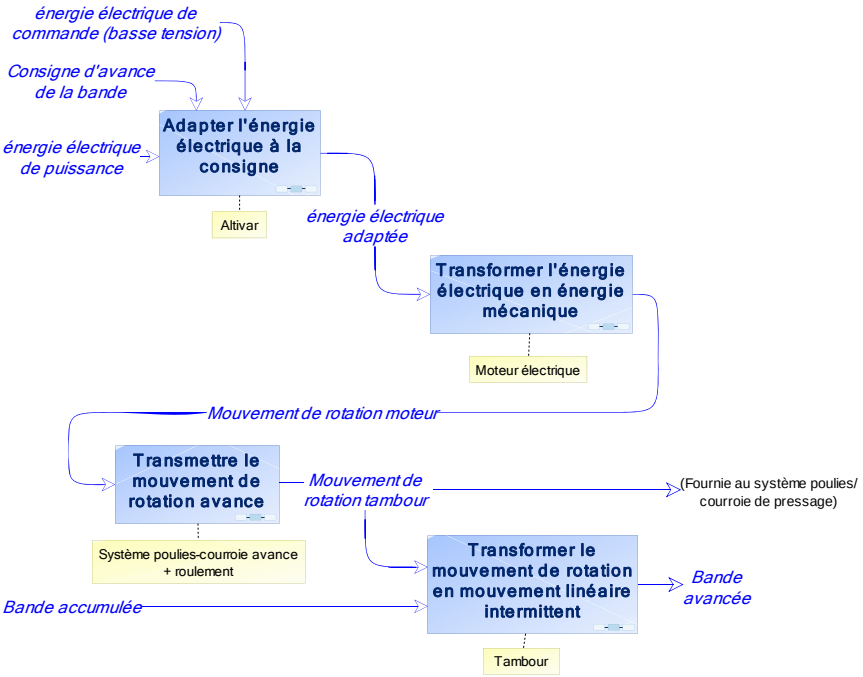


Figure 61. Décomposition de la fonction « Avancer la bande » (niveau composant)

La fonction de presse/poinçonnage se décompose en trois fonctions de niveau composant (figure 62) supportées également par des équipements considérés comme des composants élémentaires :

- l'ensemble système poulies/courroie + roulements transmet à l'arbre à came l'énergie mécanique fournie par le sous-système d'avance et assure la mise en position de l'arbre à came. Il n'agit donc pas sur les propriétés du mouvement de rotation (le rapport de réduction des poulies est de 1), ne modifiant que sa position dans l'espace. La courroie de type crantée permet d'assurer un calage angulaire entre l'arbre à came et le tambour, synchronisant ainsi les deux mouvements.
- l'ensemble cames+ressorts+coulisseau transforme le mouvement de rotation continu en un mouvement linéaire alternatif. Le calage angulaire entre les cames et l'arbre à came, associé au calage précédent, permet *in fine* d'obtenir une synchronisation entre le mouvement discontinu de la bande fourni par le sous-système d'avance et le mouvement alternatif du coulisseau : la bande est immobile lorsque le coulisseau est en position basse (pressage en cours) et en mouvement lorsque le coulisseau est en position haute.
- la matrice est l'effecteur du sous-système : elle réalise la dernière action de transformation (pressage) sur la bande avancée issue du sous-système précédent et crée les produits finis et les chutes (parties de la bande non transformées en produits finis). Les flux de sortie de la fonction de niveau composant « effectuer le pressage » sont donc également les flux de sortie de la fonction de niveau système « Presser la bande pas à pas ».

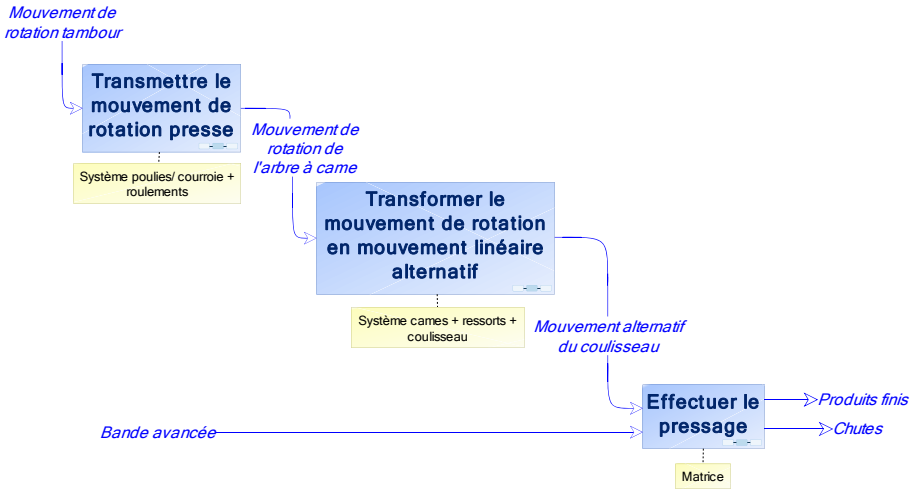


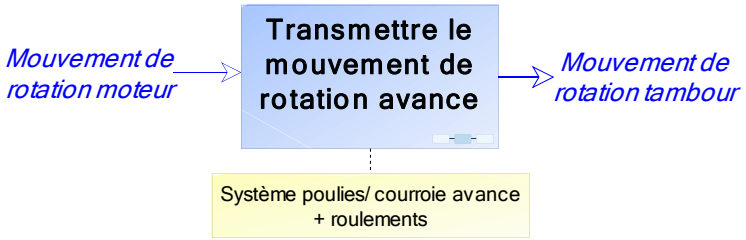
Figure 62. Décomposition de la fonction « Presser la bande » (niveau composant)

III.2. Analyses dysfonctionnelles

La mise en œuvre d'un pronostic système repose sur un ensemble de connaissances qui concerne les comportements dysfonctionnels. Comme proposé dans la méthodologie du chapitre précédent, cette connaissance est constituée notamment de la description de la causalité dysfonctionnelle extraite grâce à l'utilisation d'analyses AMDEC et HAZOP complétées par une analyse AD^{3}P.

Le tableau 14 fournit un extrait de l'analyse AD^{3}P pour la fonction « transmettre le mouvement de rotation avance » (partie analyse des modes de dégradation/défaillance) alors que le tableau 15 donne l'extrait concernant le flux de sortie de la fonction précédente « mouvement de rotation tambour » (partie analyse des déviations). On retrouve ainsi dans les champs *causes* et *conséquences* la connaissance sur la causalité dysfonctionnelle identique à celle formalisée par les études AMDEC et HAZOP. Pour cet exemple, le champ *critère de décision* s'appuie sur l'impact de l'occurrence des modes et déviations sur les performances système et sur leur fréquence d'apparition. Les champs restants contiennent les informations décrites dans le chapitre précédent. Il est à noter que dans le cas de TELMA, les déviations ne possèdent pas de variables directement influentes. Les conditions opérationnelles et environnementales jouent sur les modes de dégradation/défaillance qui engendrent les déviations au travers de la causalité dysfonctionnelle.

Tableau 14. Extrait de l'analyse AD^{3}P : fonction de niveau composant « transmettre le mouvement de rotation avance »



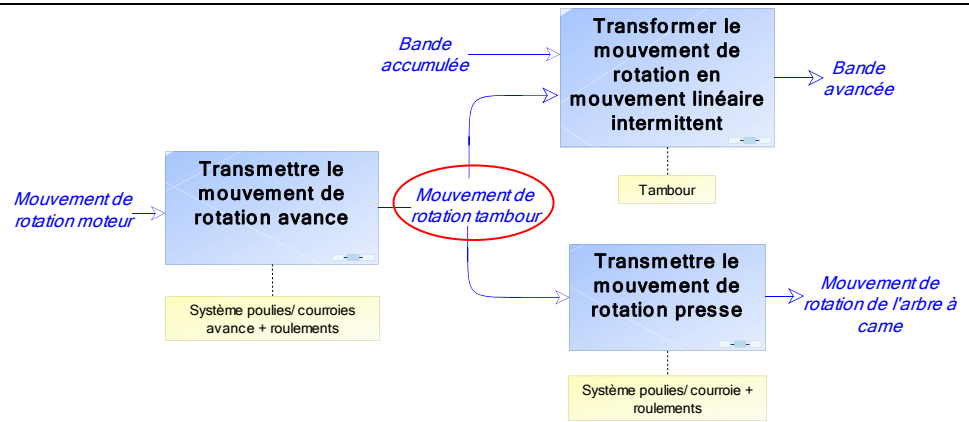
Modes de dégradation/défaillances	Causes	Conséquences	Critères de décision	Variables influentes	Indicateur d'observation	Comportements observables
Désalignement des poulies	Usure des poulies Mauvais réglage ou montage	Glissement partiel de la courroie (dégradation)	Freq. occ.[60] moyenne et pas d'impact[61]	Cadence, Charge à entraîner	Jeu, Ecart d'alignement	Augmentation progressive du jeu
		Rupture ou glissement total de la courroie (défaillance)				
Glissement partiel de la courroie (dégradation)	Allongement de la courroie	MOINS DE mouvement de rotation tambour	Freq. Occ. moyenne et impact moyen à fort	Cadence Tension initiale	Vitesse moteur et quantité de bande avancée	Brusque augmentation de la vitesse du moteur avec brusque diminution de la quantité de bande avancée
	Frottement de la courroie				Longueur de la courroie	Augmentation progressive de la longueur
	Désalignement des poulies				Etat de surface de la courroie	Perte de la rugosité de la courroie

[60] Freq. occ. : fréquence d'occurrence

[61] Impact sur la performance

Modes de dégradation/défaillances	Causes	Conséquences	Critères de décision	Variables influentes	Indicateur d'observation	Comportements observables
Dégradation des roulements	Usure par frottement et fatigue	MOINS DE mouvement de rotation tambour	Freq. Occ. importante et impact moyen	Cadence, effort axial engendré, effort radial	Couple moteur	Augmentation continue du couple moteur à fournir
					Mesure de vibration	Légère puis forte augmentation des pics fréquentiels associés aux types de dégradation
Rupture ou glissement total de la courroie (défaillance)	Allongement de la courroie	PAS DE mouvement de rotation tambour	Freq. Occ. moyenne et fort impact	Cadence Tension initiale	Vitesse moteur et quantité de bande avancée	Brusque augmentation de la vitesse du moteur avec brusque diminution de la quantité de bande avancée
	Usure par frottement de la courroie				Longueur de la courroie	Augmentation progressive de la longueur
	Désalignement des poulies				Etat de surface de la courroie	Perte de la rugosité de la courroie
Blocage/grippage des roulements	Usure par frottement et fatigue	PAS DE mouvement de rotation tambour	Freq. Occ. importante et fort impact	Cadence, effort axial engendré, effort radial	Couple moteur	Augmentation continue du couple moteur à fournir puis passage brusque à 0
					Mesure de vibration	Légère puis forte augmentation des pics fréquentiels associés aux types de dégradation puis perte totale

Tableau 15. Extrait de l'AD^{3}P : flux « mouvement de rotation tambour »



Propriétés	Déviations	Causes	Conséquences	Critère de décision	Variables influentes	Indicateur d'observation	Comportements observables
Couple	PLUS DE	PLUS DE couple moteur transmissible	PLUS DE bande avancée	Freq. Occ. faible et moyen impact	Ø	Vitesse du tambour	Augmentation de la vitesse du tambour si le couple est constant
			PLUS DE couple transmis à l'arbre à came			Couple du tambour	Augmentation du couple
	MOINS DE	MOINS DE couple moteur transmissible	MOINS DE bande avancée	Freq. Occ. importante et moyen impact	Ø	Couple du tambour	Diminution du couple du tambour
		Glissement partiel de la courroie (dégradation)	MOINS DE couple de l'arbre à came			Vitesse du tambour	Diminution de la vitesse du tambour
		Dégradations des roulements					
	PAS DE	PAS DE couple moteur transmissible	PAS DE bande avancée	Freq. Occ. importante et fort impact	Ø	Couple du tambour	Perte du couple du tambour
		rupture ou glissement total de la courroie (défaillance)	PAS DE Couple de l'arbre à came			Vitesse du tambour	Perte de la vitesse du tambour
		Blocage/grippage des roulements					

III.3. Mise en œuvre de la méthodologie de sélection des indicateurs et des modèles associés : définition de l'architecture

À partir des tableau 14 et tableau 15, les étapes de sélection des modes de dégradation/défaillance, des déviations et des indicateurs associés peuvent être faites. L'analyse du contenu du champ *critères de décision* du tableau AD^{3}P permet tout d'abord d'établir le besoin d'évaluer les performances du sous-système de pressage car elles induisent directement celles du système. L'impact important des dégradations/défaillances des composants de ce sous-système et la disponibilité de la connaissance nécessaire à l'établissement d'un pronostic de leur état permet de construire une architecture de type cumulée. Ainsi, pour chacun des flux il est nécessaire de définir les propriétés à pronostiquer, c'est-à-dire de définir les indicateurs de performance. En ce qui concerne le sous-système de pressage (figure 62) :

- Le flux principal de sortie du sous-système est le flux de produits finis. Nous associons à ce flux comme indicateur la présence du défaut de forme permettant d'évaluer la qualité du produit fini.
- Le flux d'entrée de la dernière fonction est le mouvement linéaire alternatif du coulisseau. Les indicateurs peuvent être la vitesse ou l'effort (la force linéaire). Le défaut de forme est issu de la qualité de coupe résultant de l'usure de la matrice et de l'effort sur la bande. C'est pourquoi l'effort est choisi comme indicateur.
- Le flux produit par le système poulies/courroie est un mouvement de rotation. Ainsi le couple et la vitesse de rotation sont les indicateurs associés naturels. Pour conserver le lien avec l'effort, seul le couple est retenu.
- Enfin le flux entrant du sous-système est également un mouvement de rotation et est associé avec le couple comme indicateur.

Pour le sous-système d'avance (figure 61), seuls certains composants ont un impact important sur la performance. De plus, il n'existe pas de connaissance suffisante pour établir un modèle de projection pour les modes de dégradation/défaillance définis dans l'analyse AD^{3}P. Pour ce sous-système, l'architecture de type étagée doit être utilisée et les indicateurs à projeter doivent être définis. Afin d'obtenir l'évolution future de la performance du sous-système, la quantité de bande avancée doit être projetée. Au niveau composant, la fonction la plus critique vis-à-vis des critères de décision utilisés est la fonction « transmettre le mouvement de rotation avance » qui fournit également le second flux sortant de la fonction d'avance. Les modes de dégradation/défaillance de glissement/rupture de la courroie et de dégradation/blocage des roulements sont des modes à forte occurrence et à fort impact sur la performance et observables par la création de déviations sur le couple du mouvement de rotation tambour. Toutefois, ces modes ne sont pas individuellement observables et aucun indicateur de dégradation n'est disponible. Ainsi, l'indicateur de performance de niveau composant « couple de la rotation tambour » est utilisé comme symptôme du système poulies/courroie + roulements. Les comportements dégradés observables sur cet indicateur sont induits par les dégradations du système poulies/courroie + roulements car la déviation du flux d'entrée est faible (hormis la déviation de type PAS DE). Enfin, ce flux est représentatif de la performance du sous-système, il est également le flux d'entrée du sous-système de pressage, ce qui permet d'alimenter l'architecture cumulée associée à celui-ci.

L'architecture mixte résultante est représentée sur la figure 64. Elle est donc composée de deux parties. Pour l'architecture étagée, il reste à définir les modèles de projection pour le couple

d'entraînement associé au tambour et pour la quantité de bande avancée. L'architecture cumulée demande pour sa part de construire les fonctions d'agrégation d'impacts et de définir les indicateurs de dégradation et leurs modèles de projection associés.

III.3.1. Sélection des modèles de projection liés au sous-système d'avance

Le poste d'avance possédant un ensemble de données provenant directement du système, le choix du modèle de projection de la quantité de bande avancée et du couple tambour se porte donc vers des modèles de type « guidé par les données ». Avant de pouvoir sélectionner le modèle de projection, une étude des données disponibles et des traitements à réaliser doit être menée pour obtenir de meilleurs indicateurs pour le pronostic.

III.3.1.a. Etude des données brutes et création des indicateurs à pronostiquer

Le couple transmis dans la chaîne cinématique (du moteur jusqu'au tambour) est directement mesuré. En revanche, il n'y a pas de mesure directe de la quantité de bande avancée. Cet indicateur doit être construit à partir des données comme la dimension des pièces et le nombre de pièces produites. Enfin, la cadence, qui est une variable influente et donc à prendre en compte, est également directement disponible. Toutes ces données brutes ont été mesurées et enregistrées pendant une période donnée dans la base de données du système de surveillance *via* CASIP SAM. Elles sont rendues disponibles par KASEM. La figure 63 montre ces données dans une fenêtre de visualisation de KASEM.

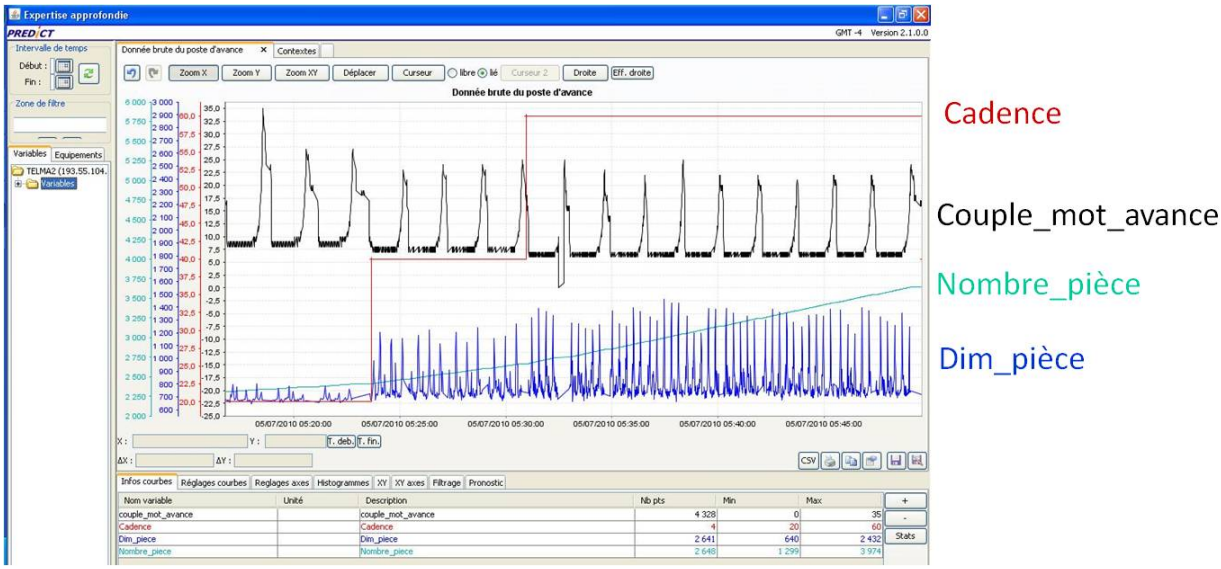


Figure 63. Données brutes pour le poste d'avance

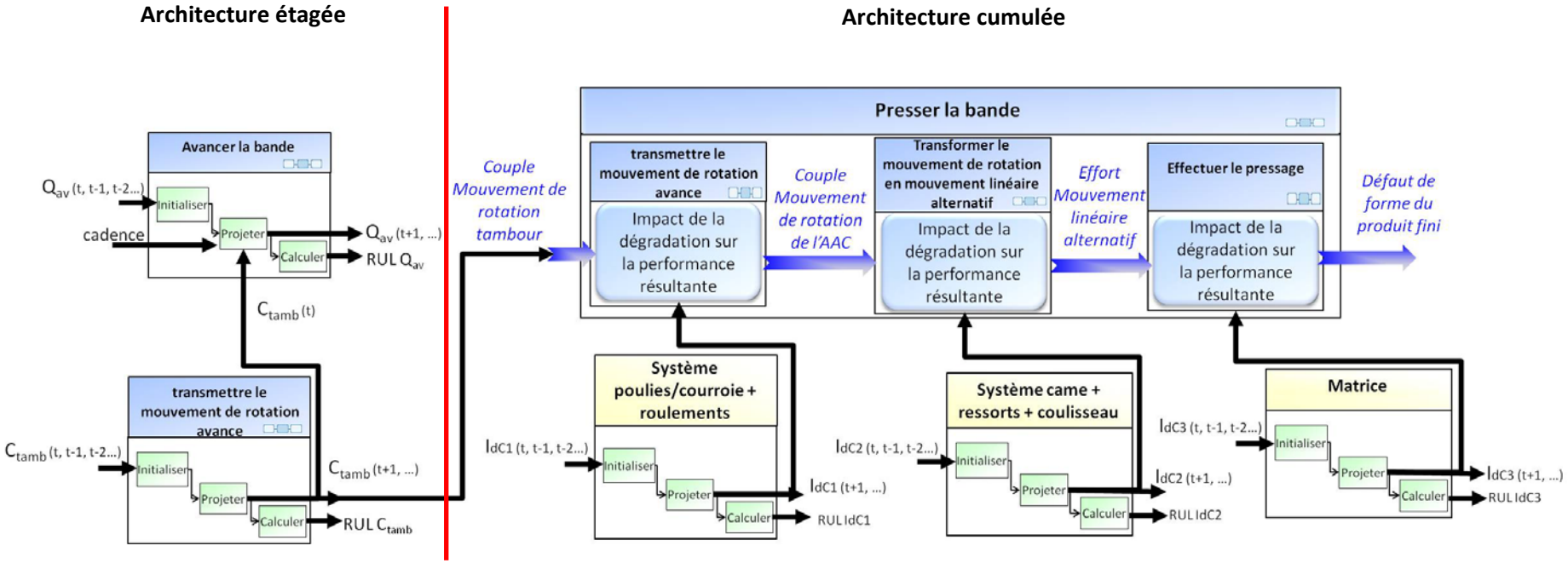


Figure 64. Architecture mixte de la fonction « Presser la bande pas à pas »

Ces données demandent à être traitées afin d'obtenir des indicateurs mis dans une forme adéquate pour la construction et l'utilisation du modèle de projection. Ainsi, un traitement sur les données du couple tambour est effectué afin de réduire le bruit pour les périodes de fonctionnement normal et d'éliminer les données associées à des périodes d'arrêt du poste d'avance (e.g. arrêt programmé, changement de bobine…). La valeur nominale du couple étant dépendante de la cadence, le traitement utilise la variable « cadence » pour s'affranchir de cette influence en ramenant l'indicateur à une valeur nominale commune (zéro dans notre cas). Ainsi, l'indicateur obtenu représente l'augmentation du couple vis-à-vis d'un niveau de fonctionnement normal. Enfin, le comportement du couple étant en relation avec le temps d'utilisation réel (et non pas la date calendaire qui intègre des périodes de non-utilisation et qui est la variable associée par CASIP SAM), une variable supplémentaire « temps depuis deb degradation » a été créée. Ainsi, pour chaque point de mesure de l'indicateur obtenu, est associé l'âge d'utilisation réel du système poulies/courroie + roulements (figure 65).

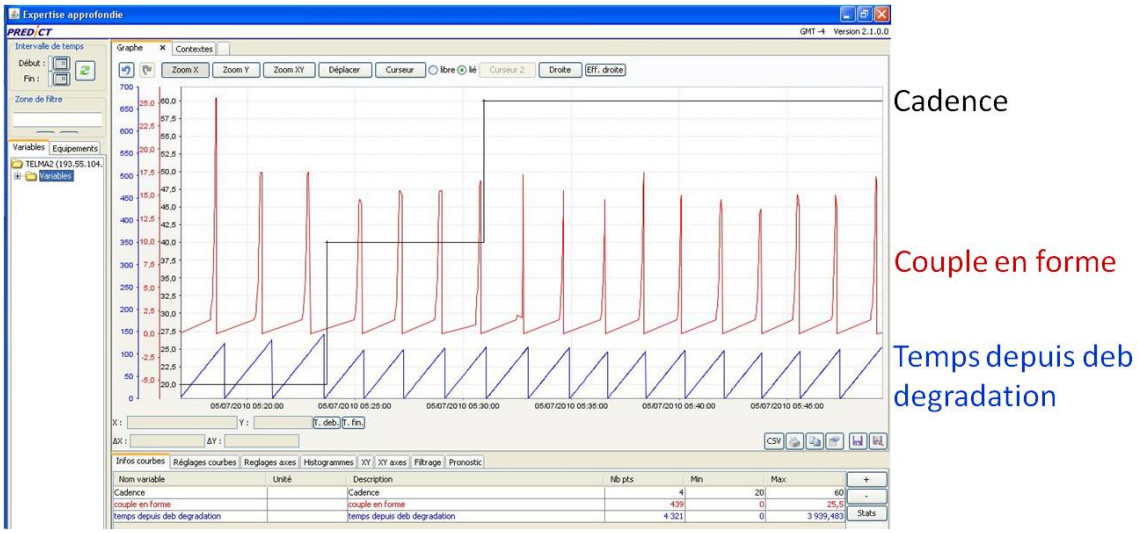


Figure 65. Visualisation des indicateurs « couple mis en forme » (rouge), de l'age réel « temps depuis deb dégradation » (bleu) et de la cadence (noir)

L'indicateur « quantité de bande avancée » doit être calculé. La valeur instantanée de cet indicateur n'est pas pertinente car le mouvement de la bande est intermittent. Ainsi l'indicateur recherché est la quantité de bande avancée pour un cycle (une pièce produite). Cette information nous est donnée par la variable « dimension des pièces ». Toutefois, la qualité des données ne permet pas d'utiliser ces valeurs de façon directe car la variabilité est trop importante (défaut du matériel de mesure). Cela nécessite de choisir une valeur moyenne sur un temps donné pour diminuer cet effet. Cet intervalle de temps doit pouvoir être suffisamment court pour conserver une notion d'indicateur proche de la valeur instantanée, mais assez long pour pouvoir intégrer un nombre de cycles suffisamment important pour réaliser une moyenne cohérente. Ainsi, le choix d'un intervalle de temps d'une minute a été fait, permettant d'obtenir une moyenne sur un minimum de vingt cycles en fonctionnement normal (la cadence minimale dans notre application est de vingt pièces par minutes). Ainsi, l'indicateur recherché (figure 66) est obtenu par le rapport entre la somme des valeurs enregistrées de la variable « dimension des pièces » dans les soixante secondes précédentes (temps calendaire) et le nombre de pièces produites pendant ce même intervalle de temps.

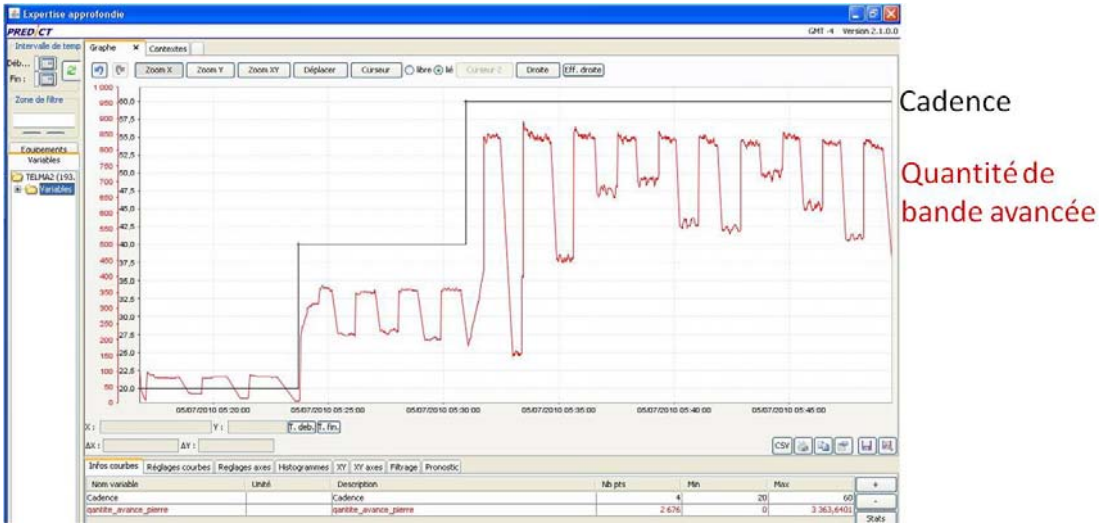


Figure 66. Visualisation des indicateurs de quantité de bande avancée (rouge) et de la cadence (noir)

III.3.1.b. Sélection des modèles de projection

L'utilisation de KASEM permet de mettre en œuvre ces traitements sur les séquences d'historiques de façon hors ligne pour observer les comportements des indicateurs obtenus. Le comportement caractéristique de l'indicateur « couple mis en forme » qui différencie nettement les périodes de fonctionnement normal des périodes anormales permet d'envisager le choix d'une régression polynomiale ou exponentielle (la mise en œuvre pratique a été réalisée par une régression exponentielle) comme outil de projection. Ce choix a été réalisé de façon empirique : la recherche s'est portée sur un modèle adapté au comportement de l'indicateur dont la dérivée de l'indicateur est en augmentation progressive (indiquant que la dégradation augmente toujours de façon plus rapide) et adapté à un signal avec peu de bruit. Les modèles de régressions polynomiale et exponentielle semblent les modèles les plus simples correspondant à ces critères (même s'ils ne sont pas les seuls à les remplir).

En revanche, l'indicateur de quantité de bande avancée ne permet pas d'obtenir des comportements représentatifs de dégradation. En effet, le système étant asservi pour garantir une cadence demandée, les effets de la dégradation sont compensés par la commande. En revanche, les effets de la défaillance d'un composant (comme la courroie par exemple) sont importants. Pour supporter ce comportement, notre choix s'est orienté sur un réseau de neurones récurrent semblable à (Wang *et al.*, 2004). D'autres choix auraient été possibles.

Notons que la performance propre de l'outil de projection ne fait pas l'objet de ce travail, aussi le choix de ce modèle a été principalement réalisé afin de mettre en avant la capacité du modèle à pouvoir utiliser des modèles de projection de natures différentes et provenant de familles classiques d'outils de projection. Nous avons voulu également montrer la possibilité de réutilisation des modèles existants issus de la bibliographie ou de bibliothèques de pronostics composants.

III.3.2. Sélection des modèles de projection liés au sous-système de pressage

L'architecture retenue pour cette partie demande tout d'abord de déterminer les indicateurs de dégradation puis de construire les modèles d'agrégation. Contrairement au sous-système précédent, peu de variables sont mesurées par le système de surveillance. Ainsi la connaissance sur l'évolution des dégradations des composants est principalement modélisée par des modèles stochastiques.

Dans le cadre de sa thèse, Muller (Muller, 2005) a défini les modèles d'évolution de ce sous-système et a utilisé pour les modéliser des réseaux bayésiens dynamiques (Dean et Kanazawa, 1989 ; Jensen, 1996). Cet outil de modélisation est de plus en plus utilisé dans le domaine de la maintenance (Weber *et al.*, 2010), et nous l'utilisons pour projeter la distribution de probabilité associée aux états possibles des composants du système de pressage. Le contenu de ces modèles, et notamment les tables de probabilités conditionnelles associées à chaque composant, est donné en annexe 2.

IV. Construction du modèle de pronostic et résultats

Le modèle obtenu est représenté figure 67. Pour construire et utiliser ce modèle, le logiciel Matlab[62] a été utilisé car différents types de réseaux de neurones ainsi que les ANFIS sont intégrés au sein des toolbox « Neural Network » et « Fuzzy Logic ». De plus, d'autres fonctions telles que la régression exponentielle sont également disponibles et utilisées dans ce travail. Ainsi, parmi les modèles de projection ou d'agrégation, seuls les réseaux bayésiens dynamiques ne sont pas exécutés avec Matlab mais avec le logiciel BayésiaLab[63].

L'exécution des modèles doit se faire de façon séquentielle : l'évolution du couple tambour doit être évaluée en premier car les résultats de ce modèle sont utilisés par le modèle de projection de la quantité de bande avancée et par l'architecture cumulée. Cette séquence est assurée par l'enchaînement des trois fonctions suivantes :

- une fonction permettant de projeter le couple tambour,
- une fonction projetant la quantité de bande avancée,
- une fonction calculant les performances futures du système de pressage.

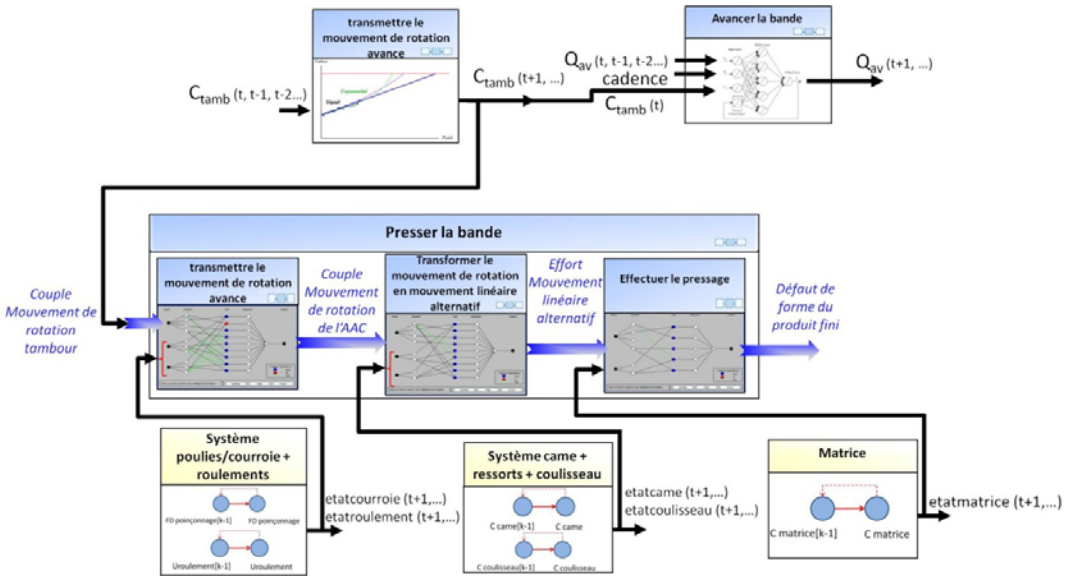


Figure 67.Modèle de projection de TELMA

[62] www.mathworks.fr/

[63] www.bayesia.com/

Ces informations sont nécessaires au bon déroulement des trois fonctions, c'est-à-dire les données d'entrée (passé proche afin d'initialiser les modèles guidés par les données) et les états futurs des réseaux bayésiens dynamiques. Les données sont fournies par KASEM *via* un fichier CSV alors que les états futurs des réseaux bayésiens dynamiques sont importés *via* un fichier texte (figure 68).

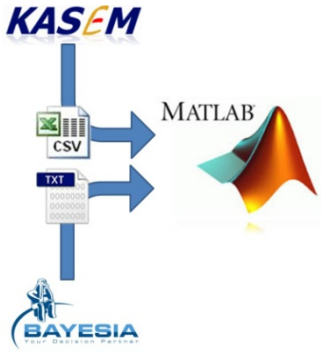


Figure 68. Importation des données dans Matlab depuis BayesiaLab et KASEM

IV.1. Construction des modèles de projection

IV.1.1. Projection du couple tambour

Nous rappelons que le modèle de projection du couple tambour est une régression exponentielle. Le comportement de la variable à projeter comprend deux phases : une phase de fonctionnement normal (la variable est égale ou proche de zéro), une autre de fonctionnement dégradé (évolution exponentielle). La fonction demande en entrée le passé proche du couple tambour, c'est-à-dire les données depuis la dernière opération de maintenance ayant remis à zéro le couple. Les données brutes peuvent contenir des données parasites en début de séquence, comme par exemple la fin du cycle de dégradation précédent. L'élimination de ces parties parasites, ainsi que la détection des phases de fonctionnement du cycle en cours se font automatiquement, permettant de différencier le fonctionnement normal du début de la dégradation. La régression peut ainsi être exécutée sur la phase de début de dégradation uniquement. Enfin, la projection se termine par la défaillance, le seuil ayant été choisi à 17 Nm compte tenu des caractéristiques mécaniques de la plateforme. La figure 69 présente le résultat de la projection et des données du passé proche (entre les dates 0 et 84, le couple est égal à zéro).

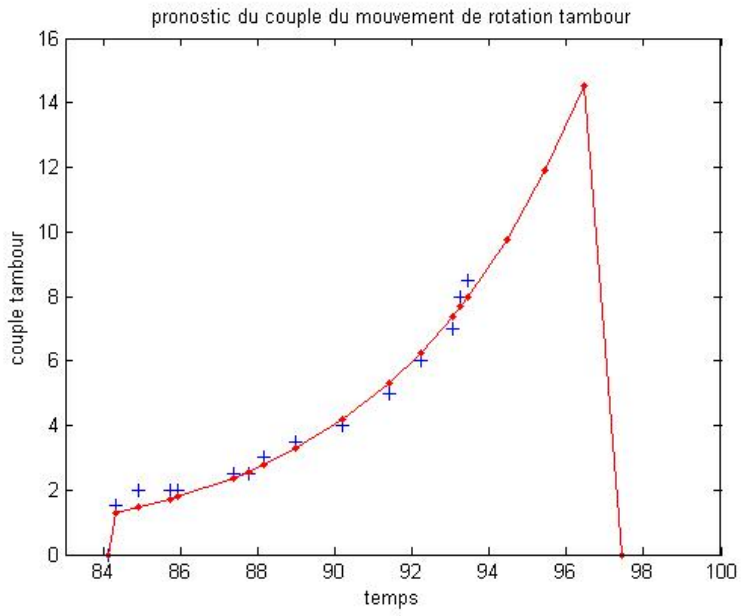


Figure 69. Projection du couple tambour en Nm (point et rouge) et données initiales (passé proche : croix et bleu) (le temps est donné en dizaine de seconde)

IV.1.2. Projection de la quantité de bande avancée

Cette fonction a pour objectif de projeter à l'aide d'un réseau de neurones la quantité de bande avancée. Le réseau de neurones doit également tenir compte de la cadence et du niveau de couple tambour issu de la fonction précédente. Le réseau choisi est de type feed forward, il n'est pas récurrent. La récurrence est assurée par la fonction de projection. Il est composé d'une couche d'entrée à trois neurones (la cadence et le couple au temps t et la valeur de l'indicateur au temps précédent t-1), d'une couche cachée de six neurones et d'une couche de sortie d'un neurone fournissant la quantité de bande avancée au temps t (figure 70a).

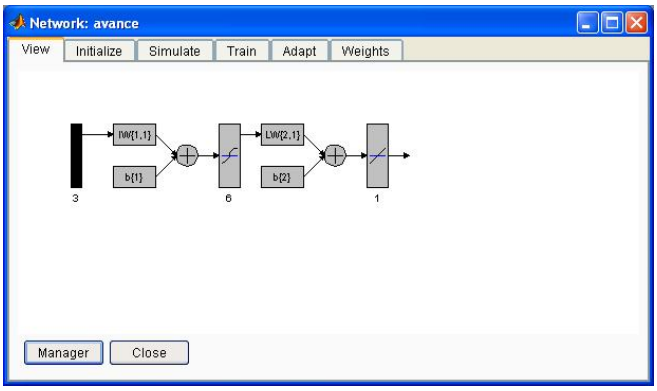


Figure 70a. Structure du réseau de neurones

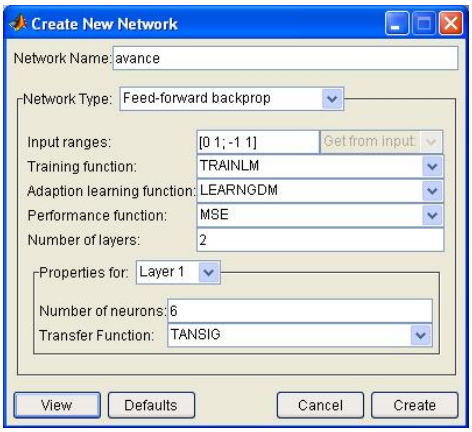


Figure 70b. Paramètres d'apprentissage

La phase d'apprentissage a été réalisée à l'aide de données d'historiques fournies par KASEM contenant 1195 pas de temps représentant 12 évolutions de la remise à neuf à la défaillance. Les paramètres d'apprentissage (algorithme d'apprentissage, critère de performance…) choisis sont les paramètres proposés par défaut par Matlab. Ainsi, l'apprentissage a été réalisé sur 1000 cycles d'apprentissage avec la recherche de l'erreur quadratique minimum. Ces paramètres sont suffisants

car l'objectif de ce travail n'est pas de démontrer les performances de projection du réseau de neurones mais de montrer l'utilisation de différents modèles de projection.

La figure 71 représente le résultat de la projection de la quantité de bande avancée (« quantité prédite »), associé aux évolutions du couple tambour mesurée (croix rouge) et projetée (« couple prédit »). Les données brutes sont issues d'un lot de 190 données d'historiques non utilisées pour la phase d'apprentissage. On observe qu'avec la défaillance due à un couple trop élevé, la quantité de bande décroit pendant 60 secondes jusqu'à zéro car cet indicateur représente une moyenne effectuée sur une fenêtre temporelle glissante de 60 secondes.

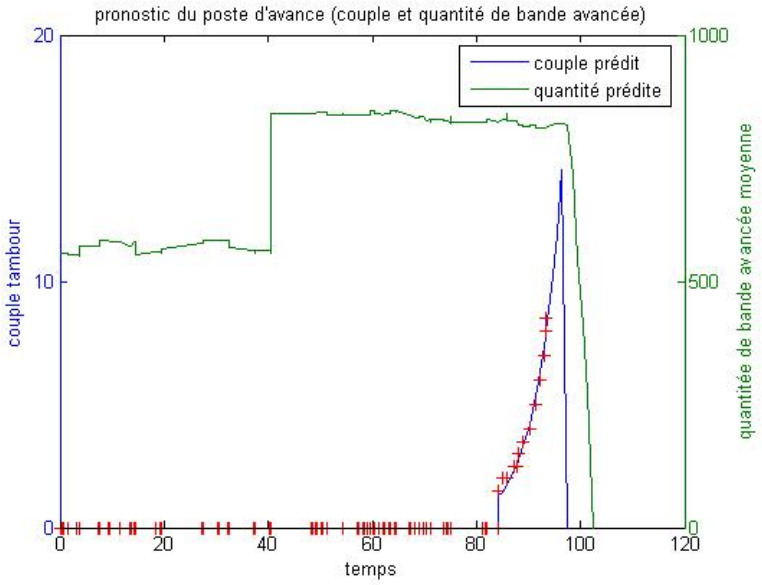


Figure 71. Projection de la quantité de bande avancée (vert) avec les couples tambour réel (rouge) et projeté (bleu) (le temps est donné en dizaine de secondes)

IV.1.3. Fonction de calcul des performances du sous-système de pressage

L'objectif de cette fonction est de calculer les performances du sous-système de pressage en fonction du couple tambour (flux d'entrée) et des états des composants fournis par les réseaux bayésiens dynamiques. Ainsi, à chaque pas de temps, cette fonction doit calculer les performances à l'aide de trois modèles ANFIS.

IV.1.3.a. Etablissement des règles logiques

La construction des ANFIS demande tout d'abord d'établir les ensembles de règles. Pour cela, il faut se reporter à l'analyse HAZOP donnée dans le tableau 16. De celle-ci sont déduites les relations causales entre les déviations des flux de sortie et les déviations des flux d'entrée et les modes de dégradation/défaillance.

Sur la base de cette analyse, les règles pour les trois ANFIS peuvent être créées et implémentées dans Matlab afin de structurer les modèles (figure 72 pour le couple du flux « Mouvement de rotation arbre à came », figure 73 pour l'effort linéaire du flux « Mouvement alternatif du coulisseau » et figure 74 pour le défaut de forme du flux « Produits finis »).

Tableau 16. Extrait de l'analyse HAZOP du sous-système de pressage

Flux	Propriétés	Déviations	Causes	Conséquences
Mouvement de rotation arbre à came	Couple (Ccoupre)	PLUS DE	PLUS DE mouvement de rotation tambour	PLUS DE mouvement alternatif du coulisseau
		MOINS DE	MOINS DE mouvement de rotation tambour	MOINS DE mouvement alternatif du coulisseau
			Glissement partiel de la courroie (dégradation)	
			Dégradation des roulements	
		PAS DE	PAS DE mouvement de rotation tambour	PAS DE mouvement alternatif du coulisseau
			Rupture ou glissement total de la courroie (défaillance)	
			Blocage/grippage des roulements	
Mouvement alternatif du coulisseau	Effort linéaire (Efflin)	PLUS DE	PLUS DE mouvement de rotation de l'arbre à came	PLUS DE Cadence de Produits finis
				PLUS DE Chutes
		MOINS DE	MOINS DE mouvement de rotation de l'arbre à came	MOINS DE Cadence de Produits finis
			Usure des cames	MOINS DE Chutes
			Usure du coulisseau	MOINS DE qualité état de coupe
		PAS DE	PAS DE Mouvement de rotation de l'arbre à came	PAS DE Défaut de forme de Produits finis
				PAS DE Chutes
Produits finis	Défaut de forme (Qdeforme)	PLUS DE	Usure de la matrice	
			MOINS DE mouvement alternatif du coulisseau	
		PAS DE[64]	PAS DE mouvement alternatif du coulisseau	

[64] La déviation PAS DE Défaut de forme du flux « Produits finis » signifie l'absence de flux, et donc aucun défaut ne peut être quantifié.

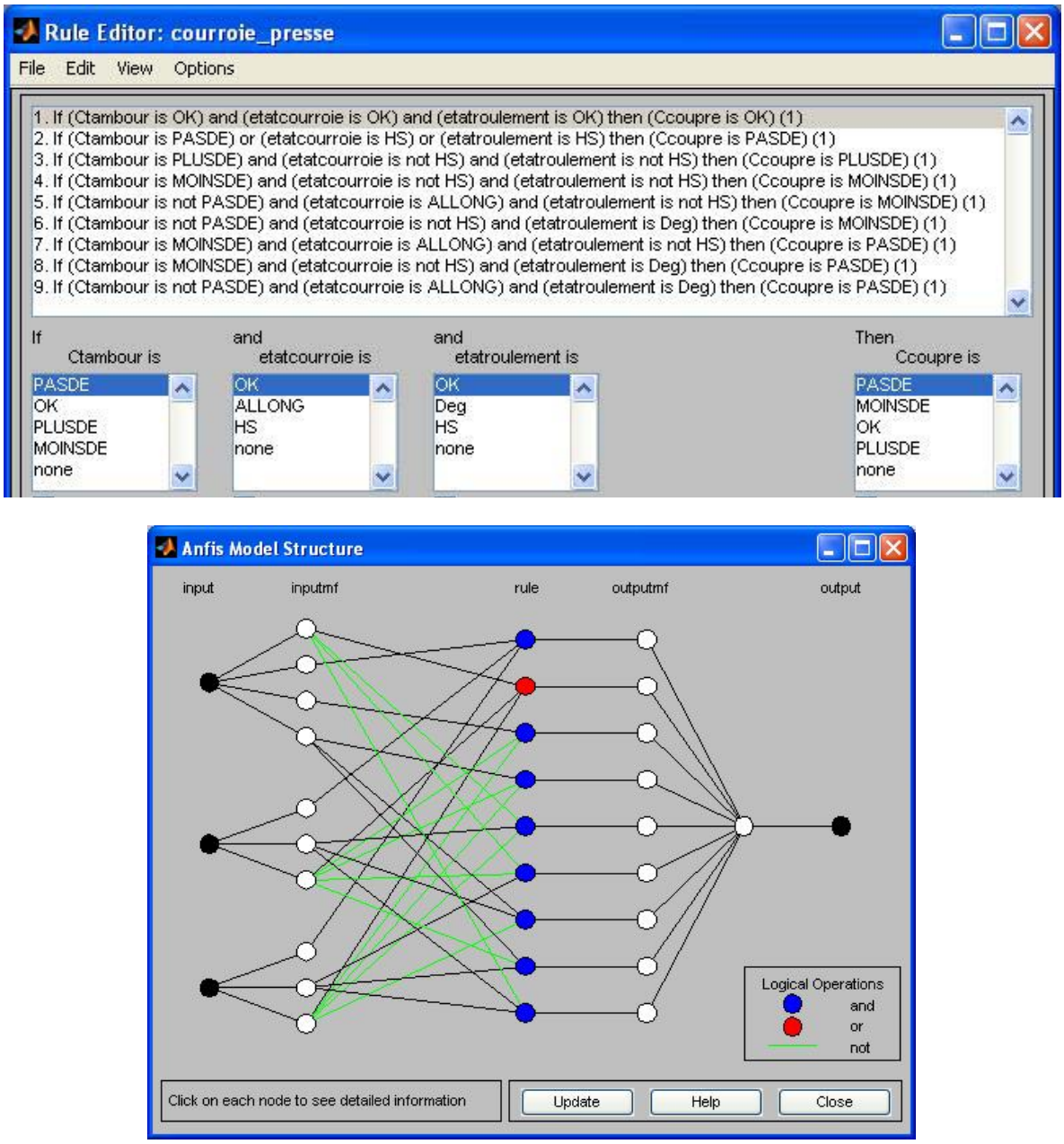


Figure 72. Règles pour l'ANFIS calculant la propriété Ccoupre et la structure associée

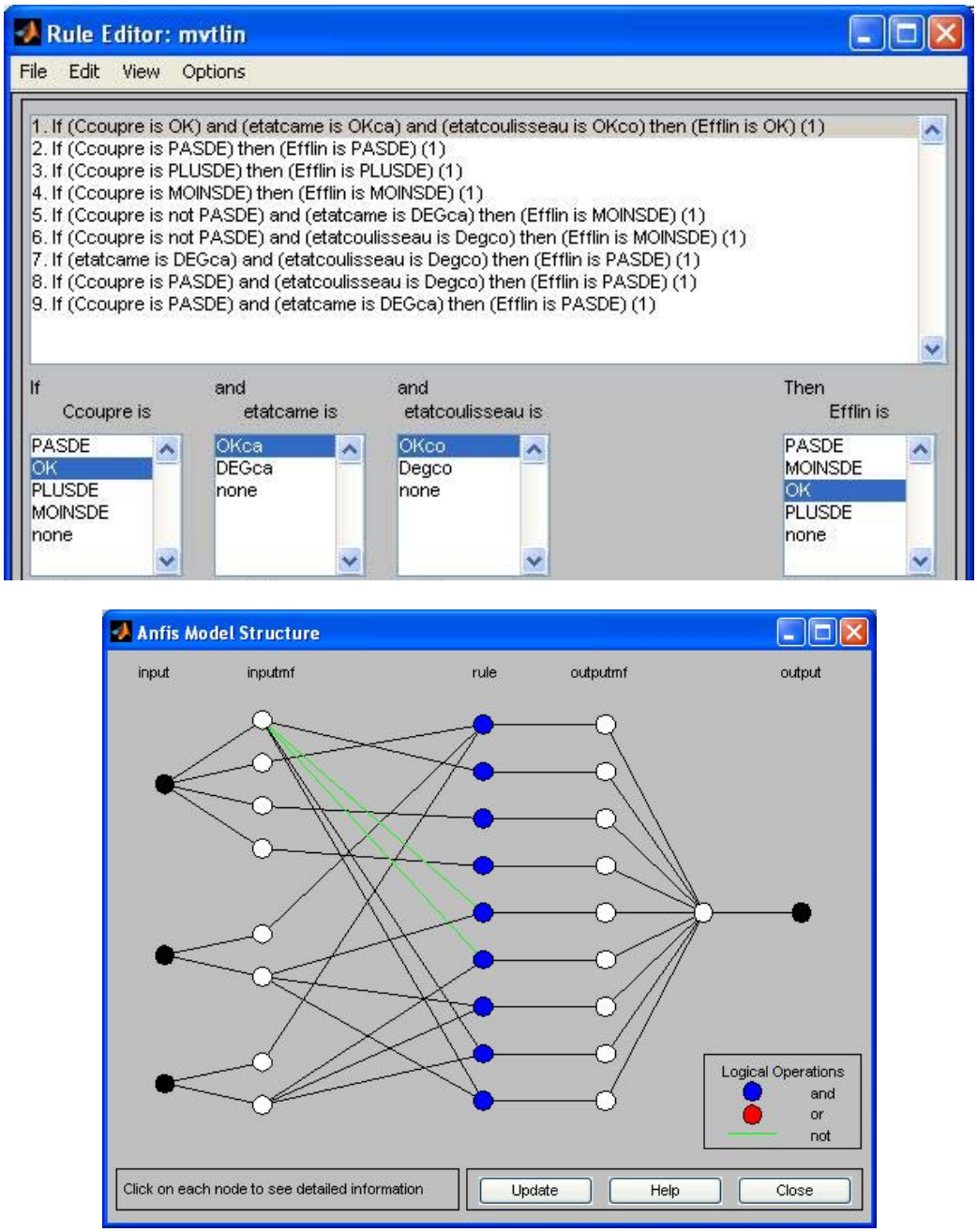


Figure 73. Règles pour l'ANFIS calculant la propriété Efflin et la structure associée

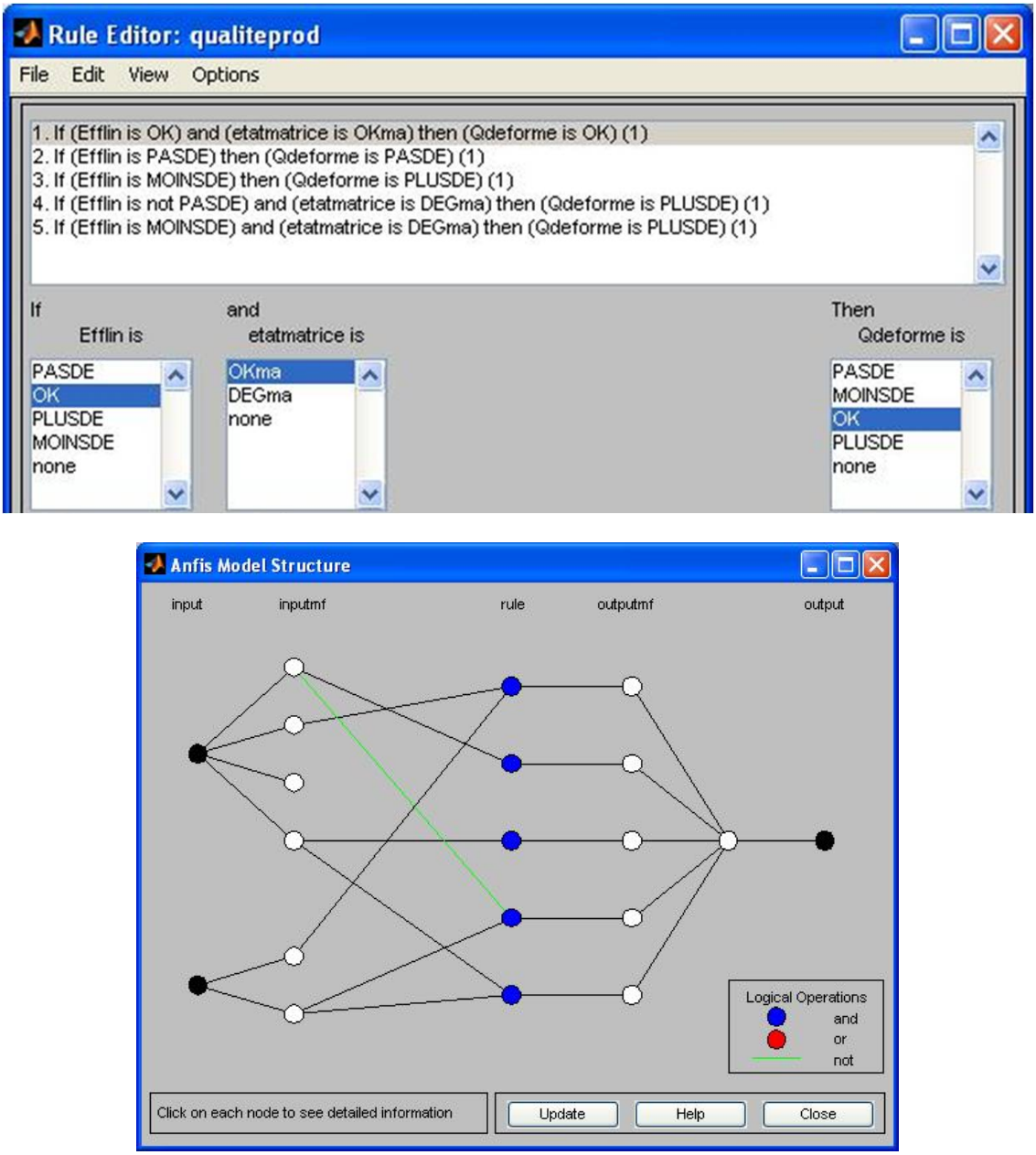


Figure 74. Règles pour l'ANFIS calculant la propriété Qdeforme et la structure associée

Les états des composants fournis par les réseaux bayésiens dynamiques doivent s'accorder avec les états intégrés dans les règles. Les règles définissent des états **OK**, **Dégradé** et **Défaillant** pour le système poulies/courroie et pour les roulements. En revanche la came, le coulisseau et la matrice n'ont que deux états : **OK** et **Dégradé**.

Les états des modèles supportés par des réseaux bayésiens dynamiques définis par (Muller,2005) sont récapitulés dans le tableau 17. Cette liste permet de montrer qu'il y a directement la correspondance pour les roulements, la came, le coulisseau et la matrice. En revanche le système poulies/courroie possède cinq états. Ils sont issus de l'agrégation de deux processus stochastiques représentant deux modes de défaillances : le désalignement des poulies et le glissement/rupture de la courroie. Toutefois le premier mode n'impacte pas sur la performance mais uniquement sur la dynamique d'évolution du second mode, c'est pourquoi il n'apparait pas dans l'HAZOP et ses conséquences sont des modes de dégradation/défaillances uniquement (voir l'extrait de l'AMDEC

tableau 18). Il est donc possible de créer des macros états définis par rapport à l'impact sur la performance en fonction de l'état du mode de glissement/rupture. Ainsi le macro-état **OK** correspond à l'état **OK** et l'état **D.Leger**, le macro-état **Dégradé** correspond à l'état **Allong** et **Allong** & **D.leger** et le macro-état **Défaillant** correspond à l'état **HS**. On retrouve donc les trois états définis dans les règles.

Tableau 17. Liste des états fournis par les réseaux bayésiens dynamiques

Composant	Etats du réseau bayésien dynamique associé
Système poulie courroie	OK, Allong, D.leger, Allong & D.leger, HS
Roulements	OK, Dégradation, HS
Came	OK, Dégradation
Coulisseau	OK, Dégradation
Matrice	OK, Dégradation

Tableau 18. Extrait de l'AMDEC du sous-système de pressage

Support	Modes de dégradation/défaillances	Causes	Conséquences
Système poulie/courroie + roulement presse	Désalignement des poulies	Usure des poulies	Glissement de la courroie (dégradation)
			Rupture ou glissement total de la courroie (défaillance)
	Glissement partiel de la courroie (dégradation)	Allongement de la courroie	MOINS DE mouvement de rotation arbre à came
		Frottement de la courroie	
		Désalignement des poulies	
	Dégradation des roulements	Usure par frottement et fatigue	MOINS DE mouvement de rotation arbre à came
	Rupture ou glissement total de la courroie (défaillance)	Allongement de la courroie	PAS DE mouvement de rotation arbre à came
		Frottement de la courroie	
		Désalignement des poulies	
	Blocage/grippage des roulements	Usure par frottement et fatigue	PAS DE mouvement de rotation arbre à came

IV.1.3.b. Paramétrage des ANFIS

La phase de paramétrage requiert une connaissance sous forme de données ou d'expertise. Le manque de données d'apprentissage ne permet d'envisager que le paramétrage par expertise uniquement. Pour les flux entrants et sortants, les fonctions de fuzzification et de défuzzification ont été réalisées conformément à la fuzzification présentée dans le chapitre précédent (section III.3.5). La figure 75 donne un exemple sur la variable **Couple tambour**.

Pour les états fournis par les réseaux bayésiens dynamiques, la fuzzification est inutile car les états sont déjà discrets. Toutefois leur utilisation par Matlab demande de les transcrire sous forme numérique. Ainsi chaque état a reçu un numéro de façon arbitraire (par exemple le système poulies/courroie sera **OK** quand son état sera égal à 0) et la correspondance avec les états des indicateurs de dégradation/défaillance est réalisée par les fonctions de fuzzification. Enfin, la fonction de défuzzification du défaut de forme a dû être traitée de façon particulière. En effet, la propriété n'a de sens que lorsqu'il y un flux de produits finis. Ainsi la déviation PAS DE qui représente la perte du flux (défaillance du système) ne peut être ramenée à un niveau de défaut de forme. Le

choix de l'associer à la valeur zéro a été fait car aucun produit ne peut atteindre cette valeur. Ainsi la valeur zéro du résultat de pronostic de cet indicateur ne représente pas un défaut de forme nul mais la perte de flux.

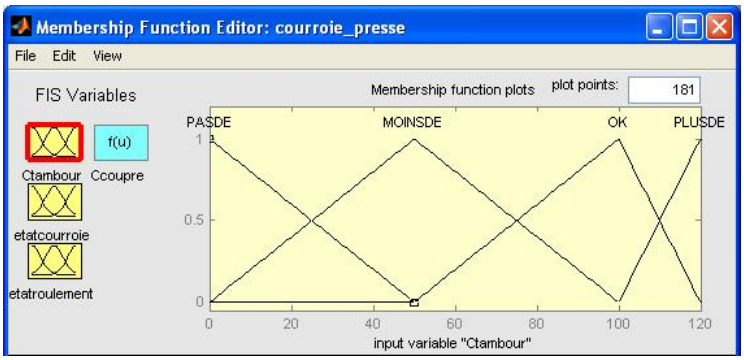


Figure 75. Fonction de fuzzification du couple tambour

IV.2. Résultats

L'exécution de la fonction globale peut être lancée, permettant de réaliser de façon séquentielle l'ensemble des projections. Les résultats issus de projection du couple tambour et de la quantité de bande avancée sont représentés sur la figure 65 et la figure 66. La représentation du résultat de pronostic du défaut de forme demande une mise en forme particulière : puisque les modèles de projection sont stochastiques, le résultat doit être représenté sous forme d'une distribution de probabilité discrète sur les états. Une fonction supplémentaire a donc été créée pour afficher le résultat pour un pas de temps donné (et donc une date donnée). Ainsi la figure 76 donne un exemple de résultat pour le pas 85. Ce résultat est constitué d'une probabilité de ne pas avoir de flux (déviation PAS DE) et d'une distribution donnant pour chaque valeur de la variable aléatoire (défaut de forme en pourcentage de la valeur maximale tolérée) la probabilité d'obtenir ce défaut dont les valeurs sont retranscrites dans le tableau 19. Cette distribution est discrète alors que l'espace de définition de la variable aléatoire est continu. Pour des raisons de lisibilité, une valeur de la variable aléatoire non associée à une probabilité signifie qu'elle possède une probabilité nulle. Ainsi la somme des probabilités de ne pas avoir de flux et des probabilités d'avoir un défaut de forme est égale à 1.

Tableau 19. Résultat au pas 85 des probabilités associées à chaque valeur

Valeur de la propriété	55,464	73,951	73,952	78,179	82,242	86,464	99,373
Probabilité d'atteindre la valeur de la propriété	4,32E-22	2,52E-11	0,013989	6,28E-21	1,68E-20	3,43E-25	2,00E-14
Valeur de la propriété	99,374	101,84	103,56	104,07	104,24	114,24	120
Probabilité d'atteindre la valeur de la propriété	1,11E-05	4,99E-24	0,54414	1,33E-23	0,20332	0,00016136	0,00043186

La probabilité d'être dans des conditions de défaillance, c'est-à-dire d'avoir un défaut de forme supérieur à 100% (valeur maximale autorisée) ou de ne pas avoir de flux, est également donnée.

Ainsi cette probabilité est obtenue par la somme de la probabilité de ne pas avoir de flux et les probabilités associées aux valeurs de la variable aléatoire supérieure à 100%.

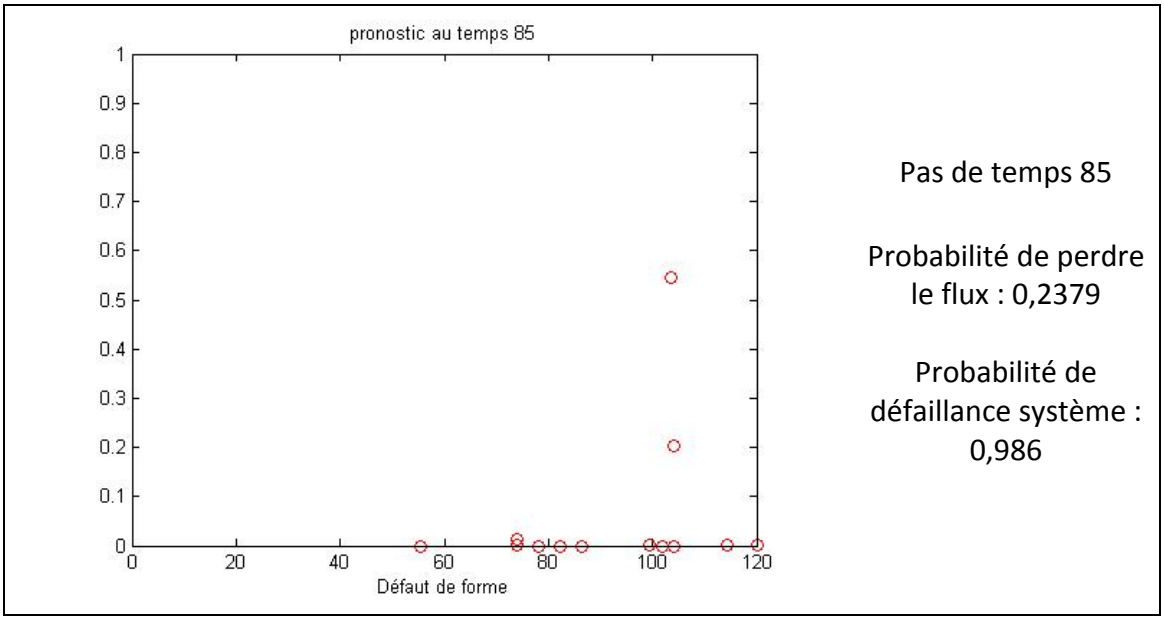


Figure 76. Résultat de la projection au pas 85 du défaut de forme des produits finis

Le résultat précédent peut être obtenu de façon similaire pour chaque pas de temps et les probabilités de perdre le flux (PAS DE) et d'être en défaillance peuvent être calculées. La figure 77 montre leurs évolutions temporelles jusqu'au pas 150 (horizon de pronostic choisi).

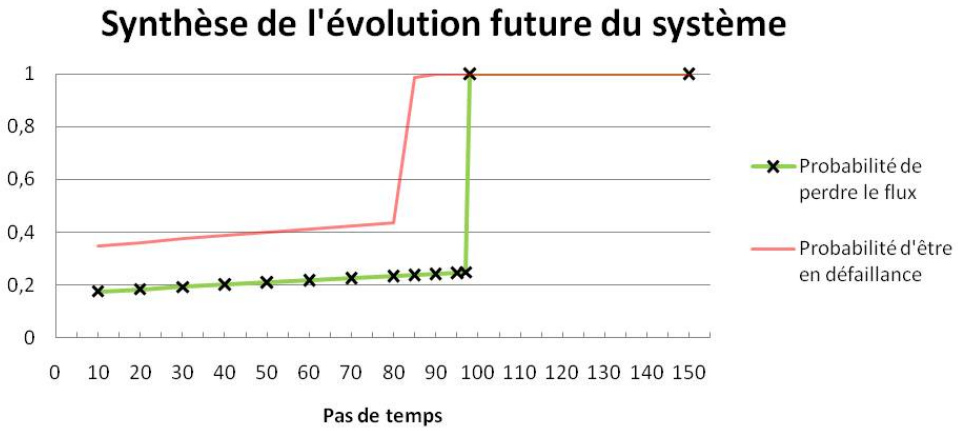


Figure 77. Evolutions temporelles des probabilités de perdre le flux et d'être en défaillance

La figure 77 permet de distinguer trois phases d'évolutions de la probabilité d'être défaillant pour ce cas d'application. On identifie une augmentation légère jusqu'au pas de temps 80, puis une phase intermédiaire où la probabilité d'être défaillant est en très forte augmentation (jusqu'au pas 84). Enfin, pour la dernière phase, les probabilités sont constantes et égales à un. On retrouve ces trois phases pour la probabilité de perdre le flux (aux dates près). Le brutal passage à un est dû à la rupture de la courroie.

La première phase correspond à la dégradation du poste de pressage, c'est-à-dire que seul l'impact des modes de dégradation des composants est visible. En effet, il n'y a pas de mode de dégradation observable sur les performances du sous-système d'avance et donc pas de déviation du couple

d'entrée. La seconde phase intègre la déviation du couple d'entrée due à la dégradation de la courroie du sous-système d'avance. On obtient ainsi une performance système qui intègre bien l'impact de toutes les dégradations du système. Enfin, la dernière phase est représentative de la défaillance totale : rupture de la courroie entraînant une perte totale de flux.

Enfin, pour obtenir un RUL, il faut fixer un seuil à partir duquel la probabilité d'être en défaillance est trop importante. La figure 78 montre l'obtention du RUL dans le cas où ce seuil est fixé à 50% et le résultat obtenu est de 81 pas de temps. Dans ce cas, le franchissement du seuil n'est pas dû à la défaillance de la courroie mais à la somme des impacts des dégradations de tous les composants (du sous-système de pressage mais aussi de la courroie) qui est devenue trop importante. Pour les seuils définis sur des probabilités (comme dans notre cas), ils représentent le risque de défaillance accepté. Pour des seuils définis sur des indicateurs de performance déterministes, le seuil doit représenter la limite vis-à-vis des performances attendues (e.g. dans le cas où les réseaux bayésiens dynamiques soient remplacés ici par des modèles déterministes projetant le défaut de forme, le seuil serait la valeur maximale du défaut accepté).

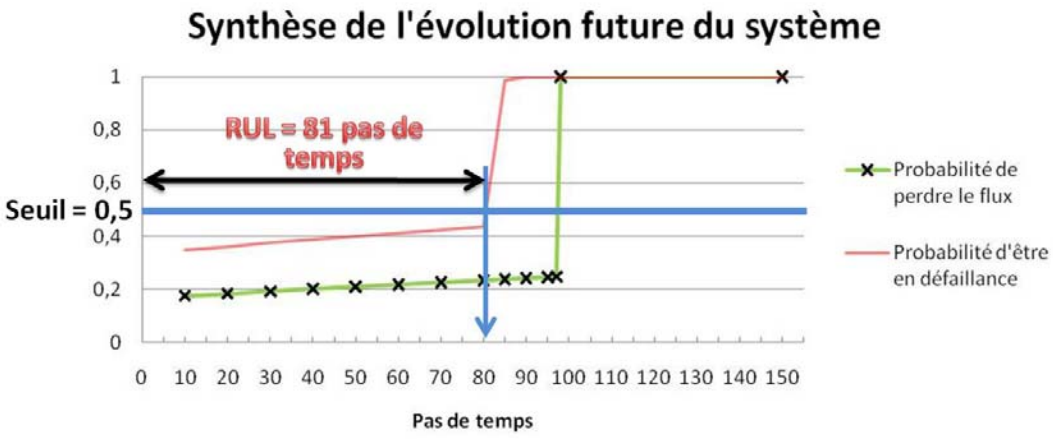


Figure 78. Obtention du RUL pour un seuil de 0,5

V. Discussion

La mise en œuvre sur une application de la méthodologie donnée au chapitre précédent a permis de montrer l'applicabilité de la méthode. Les propriétés du modèle de pronostic système recherchées, à savoir une prise en compte des effets des dégradations de l'ensemble des composants sur les performances système, une certaine modularité dans le choix des modèles de pronostic et une approche générique ont bien été respectées. Pour la première propriété, les résultats de la figure 77 montrent bien la modification du comportement de l'indicateur « probabilité d'être défaillant » avec l'apparition de la déviation du flux d'entrée. Ainsi, les modèles d'agrégation de l'architecture permettent bien d'intégrer dans la performance du système un ensemble de dégradations. En revanche, cette constatation n'est pas possible sur l'architecture étagée à cause du manque d'observabilité de la dégradation des composants sur l'indicateur de niveau sous-système utilisé (quantité de bande avancée). Dans ce cas, seule la défaillance d'un composant critique est observée.

Pour la seconde propriété, cette application a utilisé un ensemble de modèles de projection varié : certains modèles sont de nature déterministe (régression exponentielle, réseau de neurones) et

d'autres sont probabilistes (réseaux bayésiens dynamiques). Le modèle autorise ainsi une grande modularité dans le choix des modèles de projection. Une attention particulière doit toutefois être portée sur les informations transmises soit à un autre modèle de projection (architecture étagée) soit au modèle ANFIS (architecture cumulée). Dans le premier cas la définition et le paramétrage des modèles de projection doivent se faire en tenant compte des informations fournies et à fournir aux autres modèles. Dans le second cas, la définition des fonctions de fuzzification doivent permettre de transcrire les résultats de la projection de façon interprétable vis-à-vis des variables floues d'entrée. Enfin cette propriété autorise une application à un grand nombre de systèmes aux technologies variées ce qui, associé à l'utilisation d'une connaissance mise en forme de façon générique (méthode AD^3P), permet également d'assurer le caractère générique de cette méthodologie.

L'application à un cas réel a permis également de mettre en avant un ensemble de difficultés et certaines limites de la méthode. Tout d'abord, les évolutions de chaque indicateur doivent partager une référence commune au niveau temporel. La variable temps est une variable incontournable car l'objectif est d'évaluer un comportement en fonction de celle-ci. Cela demande donc une synchronisation. Or l'ensemble des modèles ne la traite pas de façon identique : ainsi certains modèles intègrent le temps comme une variable d'entrée de nature continue et d'autres ne le considèrent pas directement, le traitant de façon discrète uniquement avec une notion de pas de temps (réseau de neurones récurrent et réseaux bayésiens dynamiques). Dans ce dernier cas, les variables exogènes doivent être synchronisées en fonction du pas de temps.

Une seconde difficulté fut l'intégration conjointe de phénomènes continus et discrets dans le modèle ANFIS. Cet aspect peut être absorbé lorsque dans l'espace de l'indicateur de sortie, l'évolution, entre les sous-espaces associées à la dégradation et associées à la défaillance se fait de façon continue. Par exemple lorsque la dégradation se traduit par une déviation MOINS DE et la défaillance par une déviation PAS DE. En revanche certaines limites sont apparues lorsque le passage se fait de façon discontinue (exemple de la modélisation du défaut de forme). Dans ce cas lorsque le système est dans un état flou entre dégradation et défaillance, le résultat peut lui se trouver dans des zones non définies voire de bon fonctionnement. C'est le cas pour des dégradations entraînant des déviations PLUS DE qui aboutissent à des défaillances créant une déviation PAS DE. Enfin, en cas de non existence de la zone de défaillance dans l'espace de sortie, une zone doit être définie. Une solution éventuelle peut être la définition de deux modèles ANFIS, un premier évaluant la possibilité d'avoir un flux (dans ce cas cela revient à chercher les déviations PAS DE et OK de la propriété débit du flux) et un second évaluant la propriété recherchée lorsque le flux existe.

Enfin la dernière difficulté fut d'obtenir des indicateurs accessibles et rendant les modes de dégradation/défaillance recherchés observables. Cette problématique, particulièrement visible sur l'indicateur de quantité de bande avancée, pose la question de la testabilité des systèmes dans les cycles d'ingénierie, et montre le besoin d'intégrer ces considérations le plus tôt possible dans la conception des systèmes. La prise en compte de la capacité du système à être pronostiqué doit être faite dans la définition même du système par le choix de technologies possédant une plus grande visibilité, admettant une capacité d'observabilité meilleure ou par l'ajout de capteurs permettant de répondre à la problématique (remise en cause de la testabilité).

VI. Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet de la mise en œuvre de la démarche d'ingénierie proposée et de l'établissement d'un pronostic système sur un cas particulier. Ce dernier est issu du système Déroulage / Pressage de la plateforme TELMA et a permis de confronter la méthodologie et le modèle obtenu à un système soumis à des perturbations simulant ses propres symptômes. Cela a permis de montrer l'applicabilité et la faisabilité de la méthodologie proposée. Toutefois, elle met aussi en avant le fait que la construction du modèle de pronostic requiert une quantité importante de connaissances relatives aux comportements normaux et anormaux de la plateforme. Cette application a permis également de mettre en avant les difficultés liées à la confrontation avec un système réel.

Toutefois, une étude supplémentaire doit être menée afin de quantifier les performances du pronostic et de montrer la valeur ajoutée de la démarche proposée. Les performances du pronostic à évaluer doivent être en relation avec la qualité du résultat (précision, justesse…) mais également en relation avec les performances plus globales du système de maintenance et du système principal (coût de développement du pronostic, gain espéré, impact sur le LCC…).

Conclusion générale

Cette thèse porte sur la problématique du pronostic de systèmes industriels et sur l'impact des futures dégradations des composants sur les performances globales attendues. Elle met en avant le besoin de démarches structurées et de modèles adaptés, compatibles avec la complexité des relations entre les performances du système et l'ensemble des dégradations des composants. Pour y répondre, nous avons proposé une modélisation d'architectures du pronostic système associée à une ingénierie pour leur mise en application sur des systèmes particuliers.

En effet, l'évaluation des comportements futurs d'un système est d'un intérêt majeur car elle permet à d'autres processus de prendre au plus tôt (proactivement) les décisions nécessaires à la bonne réalisation des missions du système. De telles stratégies sont en partie prises en charge par la maintenance, processus pivot du système de soutien, afin de maîtriser au mieux la performance du système. En ce sens le pronostic système, par sa contribution à la mise en place d'une stratégie de maintenance prévisionnelle, participe à la maîtrise de la performance globale. Toutefois sa mise en œuvre demande des connaissances et informations sur les comportements du système principal, mais également une capacité de ce dernier à être pronostiqué. Ainsi des démarches d'ingénierie conjointe système principal/système de maintenance doivent être adoptées pour y parvenir. Le pronostic système et son ingénierie s'inscrivent donc dans ce contexte.

Pour répondre à ce besoin et faire face aux limites des approches « pronostic » actuelles, dans un premier temps a été proposée une modélisation générique du pronostic résultant d'une modélisation informationnelle et fonctionnelle. Cette formalisation indépendante des niveaux d'abstraction a permis de définir les attentes du pronostic système et de mettre en avant les concepts majeurs associés, tels que l'évaluation de l'ensemble des performances des différents niveaux d'abstractions et des dégradations des composants. Cela a mis en évidence que le pronostic système doit reposer sur des architectures pour structurer des modèles de performance ou de dégradation.

En ce sens, nous avons proposé deux architectures : l'architecture cumulée où seules les dégradations sont pronostiquées et les performances sont calculées (modèle d'agrégation) à partir des résultats des premiers ; et l'architecture étagée où toutes les performances et dégradations sont pronostiquées. Pour conserver une meilleure capacité de particularisation, les modèles de pronostic sont basés sur des modèles reconnus et éprouvés par la communauté alors que les modèles des impacts sont basés sur une formalisation, sous forme de règles, de la connaissance de la causalité dysfonctionnelle. Ces derniers sont supportés par un système neuro-flou (ANFIS). Pour guider le concepteur, une méthodologie de construction a été proposée aboutissant à la sélection des indicateurs à pronostiquer et au choix des architectures et modèles de pronostic/d'agrégation associés.

L'ensemble de cette démarche a été appliqué sur un sous-ensemble de la plateforme TELMA ce qui nous a permis de montrer la faisabilité de la méthodologie proposée, aussi bien d'un point de vue de l'applicabilité de l'ingénierie que de la construction des modèles élémentaires (pouvant être de nature très différente, e.g. réseau de neurones, réseaux bayésiens dynamiques, ANFIS,…) et leurs interopérations. Toutefois la validation de cette démarche demande à être confrontée à des systèmes industriels de grande dimension et les performances du pronostic système doivent faire l'objet d'une évaluation plus approfondie.

Cependant, de nombreuses perspectives à la fois scientifiques ou applicatives peuvent être formulées pour ces travaux. À court terme elles concernent l'évaluation de la démarche proposée ici, notamment par l'estimation de la performance propre du pronostic système ainsi que la valeur ajoutée sur la maintenance de la plateforme TELMA. Pour cela il est indispensable :

- De constituer un historique des dégradations de TELMA. Cela passe par la constitution de base de données mais également par le développement du système d'acquisition disponible sur TELMA, et notamment par l'instrumentation pour la mesure d'indicateurs représentatifs de dégradations (usure, chocs,…).
- De développer les processus de surveillance/diagnostic mais surtout d'aide à la décision afin de mettre en œuvre la stratégie de maintenance prévisionnelle sur le système de Déroulage / Pressage et de comparer son efficacité vis-à-vis de stratégies de maintenance plus « traditionnelles ».

Le pronostic système doit également être validé par son application à un ensemble de cas industriels réels ou issus, par exemple, d'un cas d'étude de DIAG21 ou de projets européens tels qu'IMaPla. Nous avons d'ailleurs pendant les dernier mois de ce travail de thèse contribué à la définition d'un cas test avec les partenaires du projet de l'Universidad Técnica Federico Santa María[65] (Valparaiso, Chili).

A plus long terme, des améliorations sur les modèles et/ou les outils choisis sont nécessairement à investiguer. Tout d'abord au niveau des modèles d'agrégation, nous pouvons souligner la simplicité du modèle formé par les équations logiques modélisant la causalité alors que des communautés de recherche travaillent sur des problématiques d'identification mais à des niveaux de précision et de complexité bien supérieurs. S'il semble difficile d'envisager d'identifier de façon précise l'ensemble des comportements (nominaux et dysfonctionnels), une restriction à l'utilisation de ces modèles pour le comportement nominal, associé à un modèle d'impact de la dégradation du composant sur la performance pourrait permettre de diminuer l'erreur de modélisation actuelle.

La deuxième perspective consiste à remettre en cause l'utilisation du modèle ANFIS comme outil neuro-flou. Ce modèle s'appuie sur des règles de type Tagaki-Sugeno dont les conséquences sont sous formes d'équations linéaires. Or les règles utilisées possèdent des conséquences symboliques et sont de type Mamdani. Si l'ANFIS a été choisi pour ses capacités d'adaptation et l'existence d'outils le supportant, l'utilisation de réseaux utilisant directement ces règles peut constituer une simplification de la phase de construction des modèles d'agrégation.

L'architecture étagée fait également l'objet d'une perspective. Afin de limiter la probabilité d'incohérence entre résultats de niveaux différents, nous avons proposé d'utiliser l'indicateur de niveau inférieur. Or cette opération peut ne pas être possible ou être inefficace. Toutefois il devrait être possible d'accroitre la confiance accordée à un résultat par l'introduction d'un processus de vérification de cohérence. Dans ce cas, l'objectif serait de permettre la détection d'incohérences. Le résultat de ce processus pourrait être binaire (présence d'incohérence ou non) ou pourrait être mis sous la forme d'un niveau de confiance jouant ainsi uniquement le rôle de « garde-fou ». Par exemple, un ensemble de règles pourrait permettre de comparer les RULs (figure 79).

[65] www.utfsm.cl

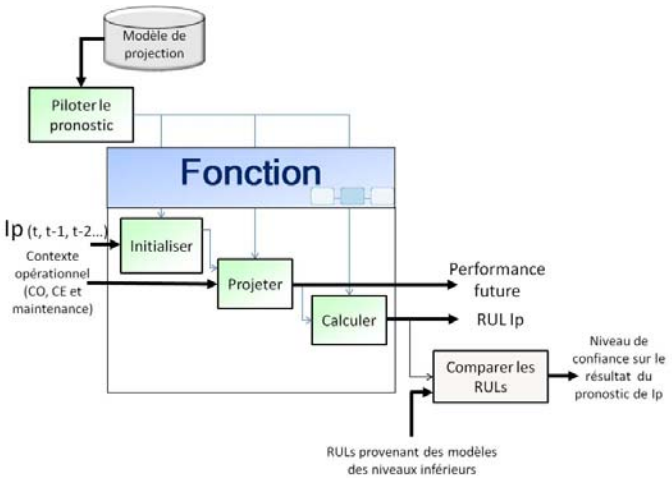


Figure 79. Structure du modèle de pronostic incluant un processus de vérification de cohérence.

Enfin la dernière perspective porte sur le verrou scientifique identifié dans le second chapitre et non traité dans ce travail. Ce verrou établit le besoin d'intégrer le contexte d'utilisation futur dans les modèles de pronostic. Puisque les conditions opérationnelles et environnementales impactent sur la dynamique d'évolutions des modes de dégradation/défaillance et des déviations, ces effets doivent être modélisés pendant la phase de projection. Pour les opérations de maintenance, elles doivent être prises en compte à leur date de réalisation située au cours de la projection. Ainsi, ces éléments doivent être considérés par les modèles de projection. De plus, la recherche de tel modèle doit être menée autant que possible de manière générique permettant ainsi une plus grande considération des différentes technologies.

Publications de l’auteur

Revues internationales avec comité de lecture

Iung B., M. Monnin, A. Voisin, **P. Cocheteux** et E. Levrat (2008). Degradation state model-based prognosis for proactively maintaining product performance, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 57(1), pp. 49-52.

Voisin A., E. Levrat, **P. Cocheteux** et B. Iung (2010). Generic prognosis model for proactive maintenance decision support: application to pre-industrial e-maintenance test bed, *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 21(2), pp. 177-193.

Conférences internationales avec actes

Cocheteux P., A. Voisin, E. Levrat et B. Iung (2009a). Methodology for assessing system performance loss within a proactive maintenance framework. *13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM'2009*, Moscou, Russie.

Thomas E., E. Levrat, B. Iung, et **P. Cocheteux** (2009). Opportune maintenance and predictive maintenance decision support. *13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM'2009*, Moscou, Russie.

Cocheteux P., A. Voisin, E. Levrat et B. Iung (2009b). Prognostic design: requirements and tools. *11th International Conference on The Modern Information Technology in the Innovation Processes of the Industrial Enterprises MITIP 2009*, Bergame, Italie.

Cocheteux P., A. Voisin, E. Levrat et B. Iung (2010). System performance prognostic: context, issues and requirements. *1st IFAC Workshop on "Advanced Maintenance Engineering, Services and Technology" A-MEST'10*, Lisbonne, Portugal.

Conférences francophones et nationales avec actes

Cocheteux P., A. Voisin, E. Levrat et B. Iung (2007). Formalisation du pronostic à base d'une approche processus. *3ème Colloque International Francophone Performance et Nouvelles Technologies en Maintenance, PENTOM 2007*, Mons, Belgique.

Cocheteux P., A. Voisin, E. Levrat et B. Iung (2009c). Méthodologie pour l'évaluation de perte de performance système dans le cadre d'une maintenance prévisionnelle. *3èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS,* Angers, France.

Ruin T., **P. Cocheteux** and E. Levrat (2009). Formalisation de la décision basée sur un pronostic pour la maintenance prévisionnelle. *4ème Colloque International Francophone Performance et Nouvelles Technologies en Maintenance, PENTOM 2009,* Autrans, France.

Conférences internationales sans actes

Cocheteux P., B. Iung, E. Levrat et A. Voisin (2009d). Formalisation of the Prognosis Process for improving performance-based Maintenance. *2nd "Product and Asset Lifecycle Management" Doctoral Winter Workshop PALM-DWW*, Aprica, Italie.

Bibliographie

Abdelwahed S. et G. Karsa (2009). Failure Prognosis Using Timed Failure Propagation Graphs. *Proceedings of the 1st Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, San Diego, CA.

Abraham A. (2001). Neuro Fuzzy Systems: State-of-the-art Modeling Techniques. *Proceedings of the 6th International Work-Conference on Artificial and Natural Neural Networks (IWAIVN 2001)*, Grenade, Espagne.

Adams D.E. et M. Nataraju (2002). A nonlinear dynamical systems framework for structural diagnosis and prognosis. *International Journal of Engineering Science*, vol. 40, pp. 1919-1941.

Adeline R., R. Gouriveau et N. Zerhouni (2008). Pronostic de défaillances : maîtrise de l'erreur de prédiction. *7ième Conférence Internationale de Modélisation et Simulation MOSIM'08*, Paris.

AFIS (2009). Découvrir et comprendre l'Ingénierie Système. *Ouvrage collectif AFIS préparé par le Groupe de Travail Ingénierie Système*.

AFNOR (1986). Norme X60-510 : Techniques d'analyse de la fiabilité des systèmes - Procédures d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE). *Association Française de Normalisation*, Paris.

AFNOR (2001). Norme NF EN 13306/X 60-319 : Terminologie de la maintenance. *Association Française de Normalisation*, Paris.

AFNOR (2002). Norme FD X 60-000 : Maintenance industrielle - Fonction maintenance. *Association Française de Normalisation*, Paris.

AFNOR (2004). Norme NF EN 60300-3-12 : Gestion de la sûreté de fonctionnement - Partie 3-12 : guide d'application - Soutien logistique intégré – Homologuée. *Association Française de Normalisation*, Paris.

Ayhan B., C. Kwan et S. Liang (2008). Adaptive Prognostics of Bearing Defects. *2008 International Conference on Prognostics and Health Management*, Denver, CO, USA.

Bagul Y., A. Zeid et S. Kamarthi (2008). Estimating Remaining Useful Life of Hard Disk Drives. *2008 International Conference on Prognostics and Health Management*, Denver, CO, USA.

Berk E. et K. Moinzadeh (2000). Analysis of maintenance policies for M machines with deteriorating performance. *IIE Transactions*, vol. 32, pp. 433-444.

Bevilacqua M. et M. Braglia (2000). The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 70, pp. 71-83.

Bevilacqua M. et M. Braglia (2006). A combined goal programming—AHP approach to maintenance selection problem. *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 91, pp. 839-848.

Biswas G. et S. Mahadevan (2007). A Hierarchical Model-based approach to Systems Health Management. *2007 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, USA.

Bolander N., H. Qiu, N. Eklund, E. Hindle et T. Rosenfeld (2009). Physics-based Remaining Useful Life Prediction for Aircraft Engine Bearing Prognosis. *Proceedings of the 1st Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, San Diego, CA.

Borello L., M. Dalla Vedova, G. Jacazio et M. Sorli (2009). A Prognostic Model for Electrohydraulic Servovalves. *Proceedings of the 1st Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, San Diego, CA.

Bouchon-Meunier B. (1995). La logique floue et ses applications. *Addison Wesley France*, Paris.

Brindle K. (2005). The relationship between life-cycle costing and performance: an exploratory analysis. *Master of Science, Vanderbilt University*.

Byington C.S., M.J. Roemer, G.J. Kacprzynski et T. Galie (2002). Prognostic Enhancements to Diagnostic Systems for Improved Condition-Based Maintenance. *2002 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, USA.

Byington C.S., M. Roemer, M. Watson, T. Galie et C. Savage (2004a). Prognostic Enhancements to Diagnostic Systems (PEDS) Applied to Shipboard Power Generation Systems. *ASME/IGTI Turbo Expo 2004-Power for Land, Sea, and Air*, Vienne, Autriche.

Byington C.S., M. Watson et D. Edwards (2004b). Data-driven network methodology to remaining life predictions for aircraft actuator components. *2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings*, Big Sky, USA.

Byington C.S., M. Watson, D. Edwards et P. Stoelting (2004c). A model-based to prognostics and health management for flight control actuators. *2004 IEEE Aerospace Conference Proceedings*, Big Sky, USA.

Camci F. et R.B. Chinnam (2006). Hierarchical HMMs for Autonomous Diagnostics and Prognostics. *2006 International Joint Conference on Neural Networks*, Vancouver, Canada.

Carnero C.M. (2004). The control of the setting up of a predictive maintenance programme using a system of indicators. *Omega*, vol. 32(1), pp. 57-75.

Cho D. et M. Parlar (1991). A survey of maintenance models for multi-unit systems. *European Journal of Operational Research*, vol. 51, pp. 1-23.

Cocheteux P., A. Voisin, E. Levrat et B. Iung (2007). Formalisation du pronostic à base d'une approche processus. *3ème Colloque Internationnal Francophone Performance et Nouvelles Technologies en Maintenance, PENTOM 2007*, Mons, Belgique.

Cocheteux P., A. Voisin, E. Levrat et B. Iung (2010). System performance prognostic: context, issues and requirements. *1st IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Services and Technology, A-MEST'10*, Lisbon, Portugal.

Crespo Marquez A.C. (2007). The maintenance management framework: Models and methods for complex systems maintenance. *Springer Series in Reliability Engineering*.

Daigle M. et K. Goebel (2009). Model-based Prognostics with Fixed-lag Particle Filters. *Proceedings of the 1st Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, San Diego, CA.

Dean T. et K. Kanazawa (1989). A model for reasoning about persistence and causation. *Computational Intelligence*, vol. 5, pp. 142-150.

DeCastro J.A., L. Tang, K.A. Loparo, K. Goebel et G. Vachtsevanos (2009). Exact Nonlinear Filtering and Prediction in Process Model-Based Prognostics. *Proceedings of the 1st Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, San Diego, CA.

Dekker R., F.A. Van der Duyn Schouten et R.E. Wildeman (1997). A review of multi-component models with economic dependence. *Mathematical Methods of Operational Research*, vol. 45(3), pp. 411-435.

Denoeux T., M.H. Masson et B. Dubuisson (1997). Advanced Pattern Recognition Techniques for System Monotoring and Diagnosis: A Survey. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 31(9-10), pp. 1509-1540.

DeSimone L.D. et F. Popoff with The WBCSD (1997). Eco-Efficiency. *MIT Press*.

Desinde M. (2006). Contribution à la mise au point d'une approche intégrée analyse diagnostique / analyse de risques. *Doctorat de l'Université Joseph Fourier.*

Diez Lledó E. (2008). Diagnostic et Pronostic de défaillances dans des composants d'un moteur d'avion. *Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse III*.

Djurdjanovic D., J. Lee et J. Ni (2003). Watchdog Agent, an infotronics-based prognostics approach for product performance degradation assessment and prediction. *Advanced Engineering Informatics*, vol. 17(3-4), pp. 109-125.

Dong Y.L., W. Gu, K. Yang et W.K. Zhang (2004). A combining condition prediction model and its application in power plant. *Proceedings of the Third International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Shanghai, Chine.

Dong M. et D. He (2007). Hidden semi-Markov model-based methodology for multi-sensor equipment health diagnosis and prognosis. *European Journal of Operational Research*, vol. 178, pp. 858-878.

Doyen L. et O. Gaudoin (2004). Classes of imperfect repair models based on reduction of failure intensity or virtual age. *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 84(1), pp. 45-56.

Ducq Y., L. Berrah et O. Sénéchal (2003). *L'évaluation des performances des systèmes de production : évolution et enjeux*, chapitre 1 du livre Evaluation des performances des systèmes de production (Traité IC2, série Productique) sous la direction de C.Tahon.

El-Koujok M., R. Gouriveau et N. Zerhouni (2008). Towards a Neuro-Fuzzy System for Time Series Forecasting in Maintenance Applications. *17th Triennal World Congress of the International Federation of Automatic Control, IFAC'08,* Séoul, Corée du Sud.

El-Koujok M., R. Gouriveau et N. Zerhouni (2010). A Neuro-Fuzzy Self Built System For Prognostics: a Way To Ensure Good Prediction Accuracy by Balancing Complexity and Generalization. *IEEE Prognostics & System Health Management Conference, PHM'2010*, Macau, Chine.

Erbe H., B. Iung et G. Morel (2007). Maintenance models and services – a survey regarding cost aspects. *Proceedings of COA 2007 - 8th IFAC Symposium on Cost Oriented Automation Affordable Automation Systems*, La Havane, Cuba.

Farrar C.R. et N.A.J. Lieven (2007). Damage prognosis: the future of structural health monitoring. *Philosophical Transaction of the Royal Society A*, vol. 365, pp. 623–632.

Francastel J.C. (1999). La fonction maintenance – De l'expression à la satisfaction du besoin. *AFNOR, Paris*, 354 pages.

Garvey D., J. Baumann, J. Lehr et J.W. Hines (2008). Prognosis of Directional Drilling Tools. *2008 International Conference on Prognostics and Health Management*, Denver, CO, USA.

Garvey D.R. et J.W. Hines (2008). An Integrated Fuzzy Inference-based Monitoring, Diagnostic, and Prognostic System for Intelligent Control and Maintenance. *Foundations of Generic Optimization, Volume 2 : Applications of Fuzzy Control, Genetic Algorithms and Neural Networks*, *Springer*, pp. 203-222.

Gasperin M., P.Boskoski et D.Juricic (2009). Prognosis of Gear Health using Stochastic Dynamical Models with Online Parameter Estimation. *Proceedings of the 1st Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, San Diego, CA.

Godichaud M. (2009). Outils d'aide à la décision pour la sélection des filières de revalorisation des produits issus de la déconstruction des systèmes en fin de vie : application au domaine aéronautique. *Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse*.

Goebel K. et P. Bonissone (2005). Prognostic Information Fusion for Constant Load Systems. *Proceedings of the 7th Annual Conference on Information Fusion, Fusion 2005*, vol. 2, pp. 1247 -1255.

Goh K.M., B. Tjahj, T. Baines et S. Subramaniam (2006). A Review of Research in Manufacturing Prognostics. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Informatics*, New York.

Groover M.P. (2007). Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing. *Prentice-Hall Inc.*, New Jersey.

GT MACOD (2003). Présentation du groupe de travail : Modélisation et optimisation de la MAintenance COopérative et Distribuée (MACOD) au GDR MACS. *Journées du Pôle STP*, Nantes, France.

Gupta S. et A. Ray (2007). Real-time fatigue life estimation in mechanical structures. *Measurement science and technology*, vol. 18, pp. 1947-1957.

Heimes F. (2008). Recurrent Neural Networks for Remaining Useful Life Estimation. *2008 International Conference on Prognostics and Health Management*, Denver, CO, USA.

Heng A., S. Zhang, A.C.C. Tan et J. Mathew. (2009). Rotating machinery prognostics: State of the art, challenges and opportunities, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23 (3), pp. 724-739.

Hess A. (2001). The Joint Strike Fighter (JSF) : Prognostics and Health Management. http://www.dtic.mil/ndia/2001systems/hess.pdf.

IEC (2001). Norme IEC 61882 : Etudes de danger et d'exploitabilité (études HAZOP) – Guide d'application. *International Electrotechnical Commission*, Genève.

ISO (2004). Norme ISO 13381-1 : Surveillance et diagnostic des machines — Pronostic — Partie 1: Lignes directrices générales. *International Standard Organization (ISO)*.

Iung B., E. Levrat, A. Crespo Marquez, H. Erbe (2009). Conceptual framework for e-Maintenance: Illustration by e-Maintenance technologies and platforms. *Annual Reviews in Control*, vol. 33, pp. 220-229.

James M.L. et L.P. Dubon (2000). An Autonomous Diagnostic and Prognostic Monitoring System for NASA's Deep Space Network. *2000 IEEE Aerospace Conference Proceedings*, Big Sky, USA.

Jang J.S.R. (1993). ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 23, pp. 665-685.

Jardine A.K.S., D. Lin et D. Banjevic (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 20, pp. 1483-1510.

Jensen F.V. (1996). An Introduction to Bayesian Networks. *Editions UCL Press*, London, UK.

Jones J.V. (2006). Integrated logistics support handbook. *McGraw-Hill*, NewYork, 3rd edition.

Kacprzynski G.J., A. Liberson, A. Palladino, M.J. Roemer, A.J. Hess et M. Begin (2004). Metrics and Development Tools for Prognostic Algorithms. *2004 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, USA.

Kalgren P.W., C.S. Byington et M.J. Roemer (2006). Defining PHM, a lexical evolution of maintenance and logistics. *IEEE AUTOTESTCON 2006 Conference Record*, Anaheim, California.

Kelly A. (1997). Maintenance Organizations a Systems: Business-centred Maintenance. *Butterworth-Heinemann*, Oxford.

Knezevic J., L. Papic et B. Vasic (1997). Sources of fuzziness in vehicle maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 3(4), pp. 281-28.

Kramer S. et I.Y. Tumer (2009). Towards StateCharts Based Failure Propagation Analysis for Designing Embedded PHM Systems. *Proceedings of the 1st Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, San Diego, CA.

Kumar D., Crocker J., Knezevic J. et El-Haram M. (2000). Reliability, maintenance and logistic support: a life cycle approach. *Kluwer Academic Publisher*, Dordrecht, MA.

Kurtoglu T. et I.Y. Tumer (2007). FFIP: a framework for early assessment of functional failures in complex systems. *International conference on engineering design, ICED'07*, Paris.

Leão B.P., T. Yoneyama, G.C. Rocha et K.T. Fitzgibbon (2008). Prognostics Performance Metrics and their Relation to Requirements, Design, Verification and Cost-Benefit. *2008 International Conference on Prognostics and Health Management*, Denver, CO, USA.

Lebold M. et M. Thurston (2001). Open Standards for Condition-Based Maintenance and Prognostic Systems. *5th Annual Maintenance and Reliability Conference (MARCON 2001)*, Gatlinburg, USA.

Lee J. (1998). Teleservice engineering in manufacturing: challenges and opportunities. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 38(8), pp. 901-910.

Lee J., J. Ni, D. Djurdjanovic, H. Qiu et H. Liao (2006). Intelligent prognostics tools and e-maintenance. *Computers in Industry*, vol. 57, pp. 476-489.

Léger A. (2009). Contribution à la formalisation unifiée des connaissances fonctionnelles et organisationnelles d'un système industriel en vue d'une évaluation quantitative des risques et de l'impact des barrières envisagées. *Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1*.

Léger J.B. (1999). Contribution méthodologique à la maintenance prévisionnelle des systèmes de production : Proposition d'un cadre Formel de Modélisation. *Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1*.

Lei Z., L. Xingshan, Y. Jinsong et G. ZhanBao (2007). A Genetic Training Algorithm of Wavelet Neural Networks for Fault Prognostics in Condition Based Maintenance. *The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments-ICEMI'2007.*

Levrat E. et B. Iung (2007). TELMA : A full e-maintenance platform.*Proceedings of the Second World Congress on Engineering Asset Management and the Fourth International Conference on Condition Monitoring WCEAM/CM*, Harrogate, Angleterre.

Levrat E., B. Iung et A. Crespo Marquez (2008). E-maintenance: review and conceptual framework. *Production Planning & Control*, vol. 19 (4), pp. 408–429.

Li Y., T.R. Kurfess et S.Y. Liang (2000). Stochastic prognostics for rolling element bearings. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 14(5), pp. 747-762.

Li C. et K.H. Cheng (2007). Recurrent neuron-fuzzy hybrid-learning approach to accurate system modeling. *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 158, pp. 194-212.

Li X., B.S. Lim, J.H. Zhou, S. Huang, S.J. Phua, C.K. Shaw et M.J. Er (2009). Fuzzy Neural Network Modelling for Tool Wear Estimation in Dry Milling Operation. *Proceedings of the 1st Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, San Diego, CA.

Li Y.G. et P. Nilkitsaranont (2009). Gas turbine performance prognostic for condition-based maintenance. *Applied Energy*, vol. 86(10), pp. 2152-2161.

Lin C.C et H.Y. Tseng (2005). A neural network application for reliability modelling and condition-based predictive maintenance. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 25, pp. 174-179.

Liu J., D. Djurdjanovic, J. Ni, N. Casoetto et J. Lee (2007). Similarity based method for manufacturing process performance prediction and diagnosis. *Computers in Industry*, vol. 58, pp. 558-566.

Loucopoulos P. et V. Karakostas (1995). System requirements engineering. *McGraw-Hill*, London.

Lucas P.J.F. et A. Abu-Hanna (1999). Prognostic methods in medicine. *Artificial Intelligence in Medicine*, vol. 15, pp. 105-119.

Luchinsky D.G., V.V. Osipov, V.N. Smelyanskiy, A. Patterson-Hine, B. Hayashida, M. Watson, J. McMillin, D. Shook, M. Johnson et S. Hyde (2009). Model-Based Diagnostics and Prognostics for Solid Rocket Motors. *Proceedings of the 1st Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, San Diego, CA.

Luo J., M. Namburu, K. Pattipati, L. Qiao, M. Kawamoto et S. Chigusa (2003). Model-based prognostic techniques. *AUTOTESTCON 2003 Proceedings, IEEE Systems Readiness Technology Conference,* Anaheim, Californie.

Luo J., K.R. Pattipati, L. Qiao et S. Chigusa (2008). Model-Based Prognostic Techniques Applied to a Suspension System. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics—part a: systems and humans*, vol. 38 (5), pp. 1156-1168.

Mathew S., D. Das, R. Rossenberger et M. Pecht (2008). Failure Mechanisms Based Prognostics. *2008 International Conference on Prognostics and Health Management*, Denver, CO, USA.

Mathur A., K.F. Cavanaugh, K.R. Pattipati, P.K. Willett et T.R. Galie (2001). Reasoning and modeling systems in diagnosis and prognosis. *Proceeding of the 2001 SPIE - The International Society for Optical Engineering*, v*ol. 4389, pp. 194-203.*

Mayer F. (1995). Contribution au Génie Productique : application à l'Ingénierie pédagogique en Atelier Inter-Etablissements de Productique Lorrain*. Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1*.

Meier H., R. Roy et G. Seliger (2010). Industrial Product-Service Systems—IPS2. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 59, pp. 607-627.

MIL STD (1993). Norme MIL-STD-1388-2B : DoD requirements for a logistic support analysis record". *US department of defence*.

Moubray J. (1997). Reliability Centered Maintenance. *Butterworth-Heinemann*, Oxford.

Muller A., M.C. Suhner et B. Iung (2004). Bayesian network based proactive maintenance. *Seventh Int. Conf. on Probabilistic Safety Assessment and Management, PSAM 7 and ESREL'04*, Berlin, Germany.

Muller A. (2005) Contribution à la maintenance prévisionnelle des systèmes de production par la formalisation d'un processus de pronostic. *Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1*.

Muller A., M.C. Suhner et B. Iung (2008a). Formalisation of a new prognosis model for supporting proactive maintenance implementation on industrial system. *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 93(8), pp. 234-253.

Muller A., A. Crespo Marquez et B. Iung (2008b). On the concept of e-maintenance: review and current research. *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 93(8), pp. 1165-1187.

Niu G. et B.S. Yang (2009). Dempster–Shafer regression for multi-step-ahead time-series prediction towards data-driven machinery prognosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 23 (3), pp. 740-751.

Nowlan F.S. et H.F. Heap (1978). Reliability Centered Maintenance. *United Airlines Publications*, San Fransisco.

Orchard M.E. et G.J. Vachtsevanos (2009). Aparticle-filtering approachfor on-line fault diagnosis and failure prognosis. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 31(3/4), pp. 221-246.

Parida A. et U. Kumar (2006). Maintenance performance measurement (MPM): issues and challenges. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 12 (3), pp. 239-251.

Patrick-Aldaco R. (2007). A model based framework for fault diagnosis and prognosis of dynamical systems with an application to helicopter transmissions. *Ph.D. thesis of Georgia Institute of Technology*.

Pecht M. et R. Jaai (2010). A prognostics and health management roadmap for information and electronics-rich systems. *Microelectronics Reliability*, vol. 50, pp. 317-323.

Peng Y.,M. Dong et M.J. Zuo (2010). Current status of machine prognostics in condition-based maintenance: a review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 50(1-4), pp. 297-313.

Peysson F., M. Ouladsine, R. Outbib, J.B. Leger, O. Myx et C. Allemand (2008). Damage Trajectory Analysis based Prognostic. *2008 International Conference on Prognostics and Health Management*, Denver, CO, USA.

Peysson F. (2009). Contribution au pronostic des systèmes complexes. *Doctorat de l'Université Paul Cézanne, Aix-Marseille III*.

Provan G. (2003). Prognosis and condition-based monitoring: an open systems architecture. *5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, Washington, USA.

Przytula K.W. et A. Choi (2008). An Implementation of Prognosis with Dynamic Bayesian Networks. *2008 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, USA.

Qiu H., J. Lee, J. Linc et G. Yu (2003). Robust performance degradation assessment methods for enhanced rolling element bearing prognostics. *Advanced Engineering Informatics*, vol. 17, pp. 127-140.

Rebitzera G.,T. Ekvallb, R. Frischknechtc, D. Hunkelerd, G. Norrise, T. Rydbergf, W.P. Schmidtg, S. Suhh, B.P. Weidemai et D.W. Pennington (2004). Life cycle assessment Part 1: Framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications. *Environment International*, vol. 30, pp. 701-720.

Reynaud E. (2003). Développement durable et entreprise : vers une solution symbiotique ? *Journée AIMS, Atelier Développement durable*, Angers.

Ribot P. (2009). Vers l'intégration diagnostic/pronostic pour la maintenance des systèmes complexes. *Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse III.*

Ribot P., Y. Pencolé et M. Combacau (2009). Functional Prognostic Architecture for the Maintenance of Complex Systems. *7th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes, SAFEPROCESS'07*, Barcelone, Espagne.

Rufus F., S. Lee et A. Thakker (2008). Health Monitoring Algorithms for Space Application Batteries. *2008 International Conference on Prognostics and Health Management*, Denver, CO, USA.

Saha B. et K. Goebel (2009). Modeling Li-ion Battery Capacity Depletion in a Particle Filtering Framework. *Proceedings of the 1st Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, San Diego, CA.

Samanta B. et C. Nataraj (2008). Prognostics of machine condition using soft computing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol.24, pp. 816- 823.

Saxena A., J. Celaya, E. Balaban, K. Goebel, B. Saha, S. Saha et M. Schwabacher (2008). Metrics for Evaluating Performance of Prognostic Techniques. *2008 International Conference on Prognostics and Health Management*, Denver, CO, USA.

Saxena A., J. Celaya, B. Saha, S. Saha, et K. Goebel (2009). On Applying the Prognostic Performance Metrics. *Proceedings of the 1st Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, San Diego, CA.

Schutz J. (2009). Contribution à l'optimisation des plans d'exploitation et de maintenance, selon une approche basée sur le pronostic : Application au domaine naval. *Doctorat de l'Université Paul Verlaine*.

Sénéchal O. (2004). Pilotage des systèmes de production vers la performance globale. *Habilitation à diriger les recherches, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis (UVHC)*.

Shin J.H., H.B. Jun, D. Kiritsis et P. Xirouchakis (2009). Function performance evaluation and its application for design modification based on product usage data. *International Journal of Product Lifecycle Management*, vol. 4 (1/2/3), pp. 84-113.

Smith G., J. Schroeder, S. Navarro et D. Haldeman (1997). Development of a Prognostics & Health Management Capability for the Joint Strike Fighter. *Proceedings of the 1997 IEEE AUTOTESTCON Conference*, Anaheim, CA.

Swanson D.C. (2001). A General Prognostic Tracking Algorithm for Predictive Maintenance. *2001 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, USA.

Takata S., F. Kimura, F.J.A.M. van Houten, E. Westkämper, M. Shpitalni, D. Ceglarek et J. Lee (2005). Maintenance: changing role in lice cycle management. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 53(2), pp. 643-655.

Tatsuno K., F. Ohi et T. Nishida (1983). Opportunistic maintenance policy with minimal repair. *Mathematica Japonica*, vol. 28, pp. 327-335.

Thomas E., E. Levrat et B. Iung (2008). Overview on Opportunistic Maintenance. *9th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems, IMS'08*, Szczecin, Poland.

Thomas E. (2009).Contribution à la prise de décision dynamique en maintenance prévisionnelle par formalisation d'un principe d'opportunité. *Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1*.

Tran V.T., B.S. Yang, A.C.C. Tan (2009). Multi-step ahead direct prediction for the machine condition prognosis using regression trees and neuro-fuzzy systems. *Expert Systems with Applications*, vol. 36, pp. 9378-9387.

Traore M., E. Duviella et S. Lecoeuche (2009). Pronostic de défaillance pour la maintenance d'un système de thermorégulation. *3èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS, JD-JN-MACS 2009*, Angers, France.

Uckun S., K. Goebel et P.J.F. Lucas (2008). Standardizing Research Methods for Prognostics. *2008 International Conference on Prognostics and Health Management*, Denver, CO, USA.

Van Houten F.J.A.M., T. Tomiyama et O.W. Salomons (1998). Product modelling for model-based maintenance. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 47(1), pp. 123–129.

Vasile O.E. (2008). Contribution au pronostic de défaillances par réseau neuro-flou : maîtrise de l'erreur de prédiction. *Doctorat de l'Université de Franche-Comté*.

Villemeur A. (1988). Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels. *Collection de la direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, Eyrolles*, France.

Vlok P.J., J.L. Coetzee, D. Banjevic, A.K.S. Jardine et V. Makis (2002). Optimal component replacement decisions using vibration monitoring and the proportional-hazards model. *Journal of the Operational Research Society*, vol. 53, pp. 193-202.

Voisin A., E. Levrat, **P. Cocheteux** et B. Iung (2010). Generic prognosis model for proactive maintenance decision support: application to pre-industrial e-maintenance test bed. *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 21, pp. 177-193.

Waeyenbergh G. et L. Pintelon (2002). A framework for maintenance concept development. *International Journal of Production Economics*, vol. 77, pp. 299-313.

Waeyenbergh G. et L. Pintelon (2004). Maintenance concept development:A case study. *International Journal of Production Economics*, vol. 89, pp. 395-405.

Walker M. et R. Kapadia (2009). Integrated Design of On-line Health and Prognostics Management. *Proceedings of the 1st Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society*, San Diego, CA.

Wang P. et G. Vachtsevanos (1999). Fault prognosis using dynamic wavelet neural networks. *Maintenance And Reliability Conference (MARCON 99)*, Gatlinburg, USA.

Wang P. et G. Vachtsevanos (2001). Fault prognostics using dynamic wavelet neural networks. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, vol. 15, pp. 349-365.

Wang H. (2002). A survey of maintenance policies of deteriorating systems, *European Journal of Operational Research*, vol. 139(3), pp. 469-489.

Wang W.Q., M.F. Golnaraghi et F. Ismail (2004). Prognosis of machine health condition using neuro-fuzzy systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 18, pp. 813–831.

Wang W. (2007). A two-stage prognosis model in condition based maintenance. *European Journal of Operational Research*, vol. 182, pp. 1177-1187.

Wang T., J. Yu, D. Siegel et J. Lee (2008). A Similarity-Based Prognostics Approach for Remaining Useful Life Estimation of Engineered Systems. *2008 International Conference on Prognostics and Health Management*, Denver, CO, USA.

Weber P., G. Medina-Oliva, C. Simon et B. Iung (2010). Overview on Bayesian networks applications for dependability, risk analysis and maintenance areas. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, doi:10.1016/j.engappai.2010.06.002.

Wireman T. (2004). Total productive maintenance. *Industrial Press*.

Yan J., M. Koc et J. Lee (2004). A prognostic algorithm for machine performance assessment and its application. *Production Planning & Control*, vol. 15(8), pp. 796-801.

Yang S.K. (2002). An experiment of state estimation for predictive maintenance using Kalman filter on a DC motor. *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 75, pp. 103-111.

Youn B., P. Wang et D.J. Gorsich (2008). A Generic Bayesian Framework for Decision-Centered Life and Reliability Prognostics. *2008 International Conference on Prognostics and Health Management*, Denver, CO, USA.

Yu G., H. Qiu, D. Djurdjanovic et J. Lee (2006). Feature signature prediction of a boring process using neural network modeling with confidence bounds. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* vol. 30, pp. 614-621.

Zhanga Z., X. Wua, X. Yanga et Y. Zhub (2006). BEPAS—a life cycle building environmental performance assessment model. *Building and Environment*, vol. 41(5), pp. 669-675.

Zhou Z.J., C.H. Hu, D.L. Xu, M.Y. Chen et D.H. Zhou (2010). A model for real-time failure prognosis based on hidden Markov model and belief rule base. *European Journal of Operational Research*, vol. 207 (1), pp. 269-283.

Zille V. (2009). Modélisation et évaluation des stratégies de maintenance complexes sur des systèmes multi-composants. *Doctorat de l'Université de Technologie de Troyes.*

Zio E. et F. DiMaio (2010). A data-driven fuzzy approach for predicting the remaining useful life in dynamic failure scenarios of a nuclear system. *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 95, pp. 49-57.

Annexes

Annexe 1 : Détail de la classification proposée des approches du pronostic

Le tableau ci-dessous contient l'ensemble des travaux bibliographiques utilisé pour réaliser la classification proposée figure 25. La correspondance entre les symboles utilisés dans le tableau est inscrite entre parenthèse pour chaque modalité de chaque critère :

- Pour quel objectif seront réalisées les actions de maintenance :
  - Fiabilité de niveau composant (Fiab C)
  - Fiabilité du système (Fiab S)
  - Performance du SP (Perf)
- Utilise-t-on les informations représentant le contexte opérationnel futur :
  - aucune (Ø)
  - conditions opérationnelles et/ou environnementales futures (CO/CE),
  - scénario de maintenance futur (Maint).
- La connaissance utilisée est issue:
  - des lois de la physique ou d'un modèle mathématique empirique de la physique (φ),
  - de données courantes (Data),
  - des lois de la physique ou d'un modèle mathématique empirique de la physique et de données courantes (φ+data),
  - d'un REX (historique et/ou expertise) et de données courantes (REX+data).

Référence	Objectif des actions de maintenance	Représentation du contexte opérationnel futur	Provenance de la connaissance
(Abbas et Vachtsenavos, 2009)	Fiab S	CO/CE	φ
(Abdelwahed et Karsai, 2009)	Fiab C	CO/CE	REX+data
(Adams et Nataraju, 2002)	Fiab C	Ø	φ
(Ayhan *et al*., 2008)	Fiab C	Ø	φ+data
(Bagul *et al*., 2008)	Fiab C	Ø	REX+data
(Biswas et Mahadevan, 2007)	Perf	Ø	φ
(Bolander *et al*.,2009)	Fiab C	CO/CE	φ+data
(Borello, *et al*., 2009)	Fiab C	CO/CE	φ+data
(Byington *et al*. , 2004b)	Fiab C	Ø	REX+data
(Byington *et al*.,2004c)	Fiab C	Ø	φ+data
(Camci et Chinnam, 2006)	Fiab C	Ø	REX+data
(Daigle et Geobel, 2009)	Fiab C	Ø	φ+data
(DeCastro *et al*., 2009)	Fiab C	Ø	φ+data
(Dong *et al*., 2004)	Fiab S	Ø	REX+data
(Dong et He, 2007)	Fiab C	Ø	REX+data
(El-Koujok *et al*., 2010)	Perf	CO/CE	REX+data
(Garvey et Hines, 2008)	Fiab C	Ø	REX+data
(Garvey, *et al*., 2008)	Fiab C	Ø	REX+data
(Gasperin *et al*., 2009)	Fiab C	Ø	Data
(Goebel et Bonissone, 2005)	Fiab C	Ø	REX+data
(Gupta et Ray, 2007)	Fiab C	Ø	REX+data
(Heimes, 2008)	Fiab C	Ø	REX+data
(Li *et al*., 2000)	Fiab C	Ø	φ+data
(Li *et al*., 2009)	Fiab C	Ø	REX+data

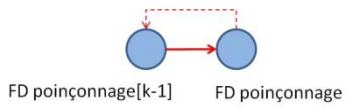
Référence	Objectif des actions de maintenance	Représentation du contexte opérationnel futur	Provenance de la connaissance
(Li et Nilkitsaranont, 2009)	Perf	Ø	Data
(Lin et Tseng, 2005)	Fiab C	Ø	REX+data
(Liu *et al*., 2007)	Perf	Ø	REX+data
(Luchinsky *et al*., 2009)	Perf	Ø	φ+data
(Luo *et al*., 2003)	Perf	CO/CE	φ
(Muller *et al*., 2008a)	Perf	Maint	REX+data
(Niu et Yang, 2009)	Fiab C	Ø	REX+data
(Orchard et Vachtsenavos, 2009)	Fiab C	CO/CE	φ+data
(Peng et Dong, 2010)	Fiab C	Ø	REX+data
(Peysson *et al*., 2008)	Fiab S	CO/CE	REX+data
(Przytula et Choi, 2008)	Fiab C	CO/CE	REX+data
(Qiu *et al*., 2003)	Fiab C	Ø	REX+data
(Ribot *et al*., 2009)	Fiab S	CO/CE	REX+data
(Rufus *et al*., 2008)	Fiab C	CO/CE	REX+data
(Saha et Geobel, 2009)	Perf	CO/CE	φ+data
(Samanta et Nataraj, 2008)	Fiab C	Ø	Data
(Swanson, 2001)	Fiab C	Ø	REX+data
(Tran *et al*., 2009)	Fiab C	Ø	REX+data
(Traore *et al*., 2009)	Fiab S	Ø	REX+data
(Vlok *et al*., 2002)	Fiab C	CO/CE	REX+data
(Wang *et al*., 2004)	Fiab C	Ø	REX+data
(Wang *et al*., 2008)	Fiab C	Ø	REX+data
(Wang et Vachtsenavos, 2001)	Fiab C	Ø	REX+data
(Wang, 2007)	Fiab C	Ø	REX+data
(Yan *et al*., 2004)	Perf	Ø	REX+data
(Yang, 2002)	Fiab C	Ø	Data
(Youn *et al*., 2008)	Fiab C	Ø	REX+data
(Yu *et al*., 2006)	Fiab C	Ø	REX+data
(Zhou *et al*., 2010)	Fiab C	CO/CE	REX+data
(Zio et Di Maio, 2010)	Fiab C	Ø	REX+data

Annexe 2 : Définition et tables de probabilités conditionnelles des réseaux bayésiens dynamiques relatifs au sous-système de presse

Les tableaux ci-dessous contiennent l'ensemble des tables de probabilités conditionnelles des réseaux bayésiens dynamiques utilisés dans le cadre de l'application. Ces tables retranscrivent l'évolution des modes de dégradation/défaillance des composants du sous-système de presse. Ces éléments sont issus de (Muller, 2005).

Composant : Système poulie courroie

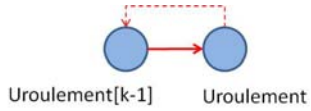
Etats du réseau bayésien dynamique associé : OK, Allong, D.leger, Allong & D.leger, HS



$FD_{poinçonnage\,k+1}$ =	OK	Allong.	D.léger	Allong. & D.léger	HS
$FD_{poinçonnage\,k}$ = OK	99,924	0,026	0,003	0,000	0,047
$FD_{poinçonnage\,k}$ = Allong.	0,000	99,971	0,000	0,003	0,026
$FD_{poinçonnage\,k}$ = D.léger	0,000	0,000	99,901	0,025	0,074
$FD_{poinçonnage\,k}$ = Allong. & D.léger	0,000	0,000	0,000	99,945	0,055
$FD_{poinçonnage\,k}$ = HS	0,000	0,000	0,000	0,000	100,000

Composant : Roulement

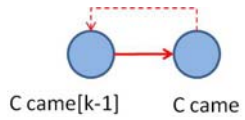
Etats du réseau bayésien dynamique associé : OK, Dégradation, HS



$U_{roulement\,k+1}$ =	OK	Dégradation	HS
$U_{roulement\,k}$ = OK	99,835	0,100	0,065
$U_{roulement\,k}$ = Dégradation	0,000	99,990	0,010
$U_{roulement\,k}$ = HS	0,000	0,000	100,000

Composant : Came

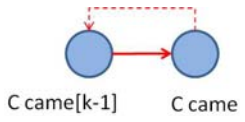
Etats du réseau bayésien dynamique associé : OK, Dégradation



	$C_{came\,k+1}$ = OK	$C_{came\,k+1}$ = Dégradation
$C_{came\,k}$ = OK	$1-\lambda(t)=1-\frac{5}{12000}\left(\frac{t}{12000}\right)^4$	$\lambda(t)=\frac{5}{12000}\left(\frac{t}{12000}\right)^4$
$C_{came\,k}$ = Dégradation	0	1

Composant : Coulisseau

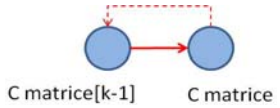
Etats du réseau bayésien dynamique associé : OK, Dégradation



	$C_{coulisseau\,k+1} = OK$	$C_{coulisseau\,k+1} = Dégradation$
$C_{coulisseau\,k} = OK$	$1-\lambda_{co}(t) = 1-\frac{4}{13000}\left(\frac{t}{13000}\right)^3$	$\lambda_{co}(t) = \frac{4}{13000}\left(\frac{t}{13000}\right)^3$
$C_{coulisseau\,k} = Dégradation$	0	1

Composant : Matrice

Etats du réseau bayésien dynamique associé : OK, Dégradation



	$C_{matrice\,k+1} = OK$	$C_{matrice\,k+1} = Dégradation$
$C_{matrice\,k} = OK$	$1-\lambda_{ma}(t) = 1-\frac{2}{3000}\left(\frac{t}{3000}\right)$	$\lambda_{ma}(t) = \frac{2}{3000}\left(\frac{t}{3000}\right)$
$C_{matrice\,k} = Dégradation$	0	1

TITRE : Contribution à la maintenance proactive par la formalisation du processus de pronostic des performances de systèmes industriels

RÉSUMÉ : Les contraintes des marchés et les attentes de la société vis-à-vis des systèmes industriels en termes économique, sécuritaire, environnementaux… requièrent de considérer les performances de ces derniers de façon globale sur l'ensemble de leur cycle de vie. Cela nécessite de mettre en synergie, par exemple avec des ingénieries couplées dès la conception, le système principal et ses systèmes contributeurs, et notamment celui de soutien avec son processus pivot de maintenance. Cette focalisation intégrative sur la maintenance a conduit à évoluer d'anciennes pratiques de maintenance vers de nouvelles plus proactives faisant émerger des stratégies prévisionnelles dont le processus clé est le pronostic. Cependant ce processus fait l'objet d'un réel manque de formalisation et les travaux existants restent principalement centrés sur les composants, sans prendre en compte les performances des systèmes. Ainsi notre contribution porte sur la proposition d'architectures génériques de pronostic système permettant d'obtenir les évolutions futures des dégradations/défaillances des composants et des performances de niveaux système/sous-systèmes/composants : soit directement par un pronostic adapté, soit par modélisation de la causalité dysfonctionnelle sous forme de relations logiques supportées par un réseau de neurones flou ANFIS. Une méthodologie est associée pour définir les indicateurs de dégradation et de performance, aboutissant à la réalisation des architectures. Enfin la faisabilité de cette approche est démontrée sur un système de déroulage/pressage de la plateforme TELMA.

MOTS CLÉS : Pronostic, Performance système, Maintenance prévisionnelle, Maintenance Proactive, Déviation, Dégradation, Défaillance, Causalité dysfonctionnelle, Ingénierie de pronostic, ANFIS.

TITLE: Contribution to proactive maintenance with the formalization of the prognostic process for industrial system performance

ABSTRACT: Today requirements and constraints on industrial systems about economic, safety, ecological… points of view lead to consider their performances with a global view taking into account all the system lifecycle. Thus the design of the system-of-interest has to be connected as soon as possible with the enabling systems designs, and more particularly the logistic support based on the key process of maintenance. This new consideration about maintenance allowed to change practices from reactive to predictive ones with the emergence of the proactive maintenance built on the prognostic process. However this process still lacks of generic formalization and existing works focus mainly on component level without tackling system performances. Therefore our contribution is related to the modelling of generic architectures for the systems prognostic which assesses future evolution of degradation/failure components and system/subsystem/component level performances: either by prognosticating with an adapted model, or by modelling the dysfunctional causality with logical relations supported by a neuro-fuzzy tool ANFIS. A methodology is given to define indicators for degradations and performances and to build architecture. Finally, the feasibility of this approach is shown on the manufacturing TELMA platform.

KEYWORDS: Prognostic, System performance, Prognostics, Proactive maintenance, Deviation, Degradation, Failure, Dysfunctional causality, Prognostic engineering, ANFIS.