



HAL
open science

Modélisation conjointe des connaissances multi-points de vue d'un système industriel et de son système de soutien pour l'évaluation des stratégies de maintenance

Gabriela Medina Oliva

► To cite this version:

Gabriela Medina Oliva. Modélisation conjointe des connaissances multi-points de vue d'un système industriel et de son système de soutien pour l'évaluation des stratégies de maintenance. Autre. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2011. Français. NNT : 2011NAN10092 . tel-01746252v1

HAL Id: tel-01746252

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01746252v1>

Submitted on 29 Mar 2018 (v1), last revised 29 May 2012 (v2)

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.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

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 **Gabriela MEDINA OLIVA**

**MODELISATION CONJOINTE DES CONNAISSANCES
MULTI-POINTS DE VUE D'UN SYSTEME INDUSTRIEL ET DE SON
SYSTEME DE SOUTIEN POUR L'EVALUATION DES STRATEGIES
DE MAINTENANCE**

Membres du jury :

Rapporteurs :

M. Christophe BERENGUER
M. François PERES

Professeur à l'Institut Polytechnique de Grenoble
Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes

Examineurs :

M. Adolfo CRESPO
MARQUEZ
M. Eric LEVRAT
M. Paul MUNTEANU
M. Benoit IUNG
M. Philippe WEBER

Professeur à l'Université de Séville (Espagne)

Maître de conférences à l'Université Henri Poincaré, Nancy I

Président de la Société BAYESIA

Professeur à l'Université Henri Poincaré, Nancy I (Directeur de thèse)

Maître de conférences à l'Université Henri Poincaré, Nancy I (Co-encadrant)

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 **Gabriela MEDINA OLIVA**

MODELISATION CONJOINTE DES CONNAISSANCES MULTI-POINTS DE VUE D'UN SYSTEME INDUSTRIEL ET DE SON SYSTEME DE SOUTIEN POUR L'EVALUATION DES STRATEGIES DE MAINTENANCE

Membres du jury :

Rapporteurs :	M. Christophe BERENGUER	Professeur à l'Institut Polytechnique de Grenoble
	M. François PERES	Professeur à l'École Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
Examineurs :	M. Adolfo CRESPO MARQUEZ	Professeur à l'Université de Séville (Espagne)
	M. Eric LEVRAT	Maître de conférences à l'Université Henri Poincaré, Nancy I
	M. Paul MUNTEANU	Président de la Société BAYESIA
	M. Benoit IUNG	Professeur à l'Université Henri Poincaré, Nancy I (Directeur de thèse)
	M. Philippe WEBER	Maître de conférences à l'Université Henri Poincaré, Nancy I (Co-encadrant)

Centre de Recherche en Automatique de Nancy

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

54506 Vandoeuvre-lès-Nancy Cedex

À ma famille

À mes amis

À Pierre

Sommaire

Sommaire	8
Liste des figures	12
Introduction générale.....	16
Chapitre 1. Evaluation de l'impact des stratégies de maintenance : Un besoin essentiel pour la maîtrise des performances globales d'une entreprise	20
1.1. Introduction.....	20
1.2. Vers la performance globale de l'entreprise à travers le maintien de la performance du système de production opérant	20
1.2.1. Performances globales d'un système industriel	20
1.1.1. Caractéristiques du SP.....	22
1.1.2. La maintenance pivot du MCO	23
1.1.3. La maintenance tout au long du cycle de vie	25
1.1.3.1. Interactions SP-SM dans la phase de conception	26
1.1.3.2. Interactions SP-SM dans la phase d'exploitation	27
1.2. Les stratégies de maintenance.....	28
1.2.1. Les méthodes de sélection des stratégies de maintenance	29
1.2.2. Les évaluations des stratégies de maintenance	30
1.3. Les approches classiques des évaluations de stratégies de maintenance: étude de leurs critères caractéristiques	33
1.3.1. Critères relatifs à la modélisation de la dégradation/défaillance.....	33
1.3.2. Critères relatifs aux actions de maintenance	34
1.3.3. Critères relatifs à l'organisation de la maintenance et à son environnement	41
1.3.4. Critères relatifs aux performances globales	46
1.3.5. Critères relatifs à la granularité du système	48
1.3.6. Techniques de modélisation.....	50
1.3.7. Bilan de l'intégration de différents critères.....	51
1.4. Bilan sur les méthodologies d'évaluation de stratégies de maintenance existantes	52
1.5. Conclusion	54
Chapitre 2. Méthodologie de formalisation des connaissances pour l'évaluation des stratégies de maintenance	58
2.1. Introduction.....	58
2.2. Formalisation de connaissances d'un système.....	58

2.2.1.	Les vues d'un système.....	58
2.2.2.	Formalisation de connaissances appliquées au SP.....	62
2.2.2.1.	Vue fonctionnelle du SP.....	62
2.2.2.2.	Vue informationnelle d'un système industriel.....	64
2.2.2.3.	Vue dysfonctionnelle du SP.....	66
2.2.3.	Formalisation de connaissances appliquées au SM.....	69
2.2.3.1.	Vue fonctionnelle du SM.....	69
2.2.3.2.	Vue informationnelle du SM (objet).....	70
2.2.3.3.	Vue dysfonctionnelle du SM.....	72
2.2.3.4.	Formalisation de connaissances sur la vue organisationnelle-humaine du SM... 75	
2.2.4.	L'interopération vs. l'intégration des connaissances des différents points de vue d'un même système.....	79
2.2.5.	L'intégration des connaissances entre le SP et le SM.....	81
2.3.	Conclusion.....	82
Chapitre 3. Motifs génériques de modélisation à base du langage probabiliste relationnel . 84		
3.1.	Introduction.....	84
3.2.	Vers des motifs génériques et exécutables.....	84
3.2.1.	Outils classiques en sûreté de fonctionnement.....	84
3.2.2.	Les Réseaux Bayésiens.....	87
3.2.3.	Les Modèles Relationnels Probabilistes (PRM).....	88
3.2.4.	Spécification du langage Skool.....	91
3.3.	Unification et Intégration des connaissances dans un PRM.....	93
3.3.1.	Définition des Motifs.....	93
3.3.2.	Assemblage des motifs.....	105
3.4.	Impact des stratégies de maintenance sur les performances du SP.....	111
3.4.1.	Impact des stratégies de maintenance sur l'aspect qualité du SP.....	111
3.4.1.1.	Impact des stratégies de maintenance sur l'aspect qualité du SP au sein du modèle PRM.....	111
3.4.2.	Impact des stratégies de maintenance sur les coûts dans les évaluations des stratégies de maintenance.....	112
3.4.1.2.	Coûts considérés dans l'évaluation des stratégies de maintenance.....	112
3.4.1.3.	Proposition d'une fonction intégrant les coûts de maintenance.....	115
3.5.	Conclusion.....	117
Chapitre 4. Rationalisation de paramètres probabilistes pour des motifs génériques de modélisation..... 118		

4.1.	Introduction.....	118
4.2.	Phase de rationalisation des paramètres des motifs génériques.....	118
4.2.2.	Quantification des motifs liés au SP (Figure 34)	120
4.2.3.	Quantification des motifs liés au SM (Figure 41).....	121
	Chapitre 5. Application de la méthodologie à un système industriel de production de ferment	134
5.1.	Introduction.....	134
5.2.	Présentation du SP : une ligne de fermentation	135
5.3.1.	Vue fonctionnelle du SP.....	136
5.3.2.	Vue informationnelle du SP.....	140
5.3.3.	Vue dysfonctionnelle du SP	141
5.3.4.	Structure du SP en PRM.....	142
5.3.4.1.	Motifs de modélisation des fonctions du SP au niveau d'abstraction élémentaire.....	142
5.3.4.2.	Motifs de modélisation sur les différents niveaux d'abstraction du SP.....	145
5.4.	Formalisation de la connaissance du système de maintenance.....	146
5.4.1.	Vue fonctionnelle du SM	146
5.4.2.	Vue informationnelle du SM.....	149
5.4.3.	Vue dysfonctionnelle du SM.....	149
5.4.4.	Structure du SM en PRM	149
5.4.4.1.	Motifs de modélisation du plan de maintenance	149
5.4.4.2.	Motifs de modélisation de l'efficacité de la logistique.....	150
5.4.4.3.	Motifs de modélisation de l'efficacité du collectif du travail.....	150
5.4.4.4.	Motifs de modélisation de l'environnement	151
5.5.	Impact sur les performances du SP	152
5.5.1.	Impact sur l'aspect qualité du SP	152
5.5.2.	Impact sur les coûts dans les évaluations des stratégies de maintenance.....	153
5.5.2.1.	Intégration des coûts vers le modèle PRM	154
5.6.	Phase de rationalisation des paramètres des motifs génériques.....	156
5.6.1.	Modalités des motifs du SP et du SM	156
5.6.2.	Quantification des motifs liés au SP (Figure 34)	156
5.6.3.	Quantification des motifs liés au SM (Figure 41).....	157
5.7.	Contribution à la Vérification et la Validation du modèle.....	163
5.8.	Exploitation du modèle par rapport à des scénarios	170
5.9.	Conclusion	177

Conclusion générale	179
Publications de l'auteur	182
Bibliographie.....	184
Annexe 1	202

Liste des figures

Figure 1. Performance orientée vers le développement durable (Kleindorfer, 2005)	21
Figure 2. Niveaux organisationnels d'une entreprise	22
Figure 3. Eléments du soutien logistique (AFIS, 2009)	24
Figure 4. Interactions entre le SP et ses systèmes de soutien logistique (et SM)	24
Figure 5. La maintenance, tout au long du cycle de vie du système de production (Levrat, <i>et al.</i> , 2008).....	26
Figure 6. Les éléments relatifs au développement d'une action de maintenance (Knezevic, <i>et al.</i> , 1997).....	28
Figure 7. Les différentes stratégies de maintenance (Léger, 1999).....	29
Figure 8. Processus d'évaluation de stratégies de maintenance (Crespo, 2008)	30
Figure 9. Interactions concernant l'évaluation des stratégies de maintenance entre les cycles en V du système principal et de maintenance	31
Figure 10. Critères relatifs aux choix de modélisation dans les évaluations des stratégies de maintenance	32
Figure 11. Chaîne de Markov à deux états	33
Figure 12. Remplacements à intervalles constants.....	35
Figure 13. Remplacements basés sur l'âge	36
Figure 14. Catégorie de processus stochastiques pour les systèmes réparables (Yanez <i>et al.</i> , 2002)	39
Figure 15. Probabilité conditionnelle d'occurrence d'une défaillance (Yanez <i>et al.</i> , 2002)	39
Figure 16. Facteurs qui impactent les performances d'un individu (Mohaghegh, 2007).....	43
Figure 17. Niveaux classiques organisationnels.....	48
Figure 18. Méthodologie pour la création des motifs génériques pour l'évaluation des stratégies de maintenance.....	56
Figure 19. Différents points de vue d'un système	60
Figure 20. Positionnement de notre méthodologie dans le cadre de modélisation Zachman.....	61
Figure 21. Représentation des flux d'une fonction	63
Figure 22. Représentation informationnelle d'une fonction et ses flux	65
Figure 23. Les causes et les conséquences de la défaillance d'une fonction	66
Figure 24. Relations de causalité entre deux fonctions (principe de propagation)	67
Figure 25. Représentation des relations entre les différents niveaux d'abstraction	67
Figure 26. Fonction principale du SM.....	70
Figure 27. Relation entre les objets de la maintenance et ses attributs	71

Figure 28. Interopération entre les modèles de connaissances métiers	80
Figure 29. Intégration des modèles de connaissances métiers	80
Figure 30. Lien fonctionnel d'une fonction principale du SP en relation avec le SM	81
Figure 31. Vue informationnelle de la fonction principale du SP et du SM	82
Figure 32. Exemple basique de relation entre variables en RB.....	87
Figure 33. Connexion en série.....	89
Figure 34. Phases de construction et d'instanciation de motifs à base de PRM	94
Figure 35. Spécialisation de classes dans le PRM.....	95
Figure 36. Construction du motif générique du SP	97
Figure 37. Causes racines de qualité d'une activité, (Mohaghegh, 2007)	97
Figure 38. Caractéristiques d'actions de maintenance	98
Figure 39. Construction du motif générique du « plan de maintenance ».....	99
Figure 40. Construction du motif générique « efficacité de la logistique » du SM	100
Figure 41. Construction du motif générique « efficacité du collectif du travail » du SM.....	102
Figure 42. Construction du motif générique « l'environnement » du SM	103
Figure 43. Construction des motifs génériques du SM	104
Figure 44. Définition des états des classes à partir d'une étude HAZOP.....	105
Figure 45. Assemblage des motifs du SP et du SM	106
Figure 46. Assemblage des motifs des fonctions du SP au même niveau d'abstraction.....	107
Figure 47. Décomposition fonctionnelle d'un SP en deux niveaux d'abstraction	108
Figure 48. Conservation des nœuds DF "n" entrée/sortie lors de la décomposition d'une fonction	109
Figure 49. Décomposition des flux SF, PF, VF lors de la décomposition d'une fonction	110
Figure 50. Calcul du flux « CR n » pour les différents niveaux d'abstraction du SP au sein du PRM	110
Figure 51. Variable d'agrégation conformité du flux.....	111
Figure 52. Coûts associés à l'évaluation des stratégies de maintenance.....	116
Figure 53. Temps non-disponible pour la réalisation du programme de maintenance	124
Figure 54. Facteurs d'aggravation liés au motif « efficacité du collectif du travail »	126
Figure 55. Schéma de structure de la ligne de production de ferment	135
Figure 56. Trois fonctions principales du système de production de ferment.....	136
Figure 57. Fonction « produire ferment » au niveau A-0.....	137
Figure 58. Arborescence de la décomposition fonctionnelle du système de production de ferment	137
Figure 59. Sous-fonctions du système de production de ferment	138

Figure 60. Vue informationnelle des fonctions associées au traitement d'ingrédients liquides...	141
Figure 61. Extrait de l'étude HAZOP sur le système de production de ferment.....	142
Figure 62. Extrait du diagramme fonctionnel pour la représentation des fonctions élémentaires du processus de fermentation -Niveau A11	143
Figure 63. Extrait du diagramme fonctionnel pour la représentation des fonctions élémentaires du processus de fermentation- Niveau A113	143
Figure 64. Passage du diagramme SADT à l'instanciation des motifs décrits dans Skool pour la fonction « A1134 ».....	144
Figure 65. Décomposition fonctionnelle de la fonction « A11 »	145
Figure 66. Assemblage de motifs du SP sur différents niveaux d'abstraction.....	146
Figure 67. Fonctions support au SP : « maintenir les vannes et les joints »	148
Figure 68. Motif de modélisation du plan de maintenance des vannes.....	150
Figure 69. Motifs de modélisation de l'efficacité de la logistique	150
Figure 70. Motifs de modélisation de l'efficacité du collectif du travail	151
Figure 71. Motifs de modélisation de l'environnement	152
Figure 72. Modèle global en PRM du système de production de ferment et de son SM (65 composants).....	152
Figure 73. Variable d'agrégation pour la « conformité du flux »	153
Figure 74. Extrait de l'intégration des coûts vers le modèle PRM.....	154
Figure 75. Analyse de la distribution a priori de la variable « efficacité de la logistique »	164
Figure 76. Analyse de la distribution a priori de la variable « débit ingrédient_F0 ».....	164
Figure 77. Analyse de la distribution a priori de la variable « charge bactérienne de l'ingrédient_F0 »	164
Figure 78. Causes les plus probables de perte de disponibilité du SP.....	165
Figure 79. Analyse de sensibilité de la variable « volume du flux A2 » dans la modalité « ok »	168
Figure 80. Analyse de sensibilité de la variable « volume du flux A2 » dans les modalités « plus » et « moins »	168
Figure 81. Analyse de sensibilité de la variable « volume du flux A2 » dans la modalité « pas »	169
Figure 82. Performances techniques du SP suite à différents types d'actions de maintenance sur des vannes	172
Figure 83. Performances économiques du SP suite à différents types d'actions de maintenance sur des vannes	172
Figure 84. Performances techniques du SP suite à différents types d'actions de maintenance sur des joints.....	173

Figure 85. Performances économiques du SP suite à différents types d'actions de maintenance sur des joints.....	174
Figure 86. Impact de FOPs sur l'efficacité du collectif de travail et sur la disponibilité du SP...	176
Figure 87. Structuration de motifs pour améliorer la robustesse des motifs PRM.....	177
Figure 88. Diminution de temps entre défaillances au cours du temps.....	206

Introduction générale

La pérennité des entreprises industrielles actuelles est non seulement liée à la satisfaction d'un ensemble de performances économiques classiques vis-à-vis du produit et/ou service qu'elle délivre, mais aussi du contrôle d'un ensemble d'exigences opérationnelles (i.e. sûreté, sécurité, réduction de la pollution...) requises pour répondre aux nouveaux contextes social et environnemental dans lesquels elles opèrent. La maîtrise de ces performances et exigences se déclinent concrètement sur les niveaux décisionnel, informationnel et opérant de ces entreprises en considérant le système opérant, comme un système, généralement complexe, transformant des flux entrants que ce soit de matière d'œuvre, d'énergie, d'informations ... en flux sortants dont le flux attendu finalisé de produit/service.

Pour ce système opérant, assimilé dans ce travail de thèse au système principal (SP) au sens de l'ingénierie système (IS) (AFIS, 2009), le concept de Maintien en Condition Opérationnelle (MCO) joue un rôle fondamental dans la maîtrise des performances et exigences (Alyouf, 2007) puisque son objectif, à travers la mise en œuvre d'un ensemble d'activités supports au SP, est de maintenir ce dernier autant que faire se peut dans ses limites de fonctionnement nominales.

Ces activités supports se matérialisent à travers le système de soutien dont la composante majeure est le système de maintenance (SM) considéré comme un levier essentiel d'action sur les performances et les exigences opérationnelles (i.e. productivité, disponibilité) (AFIS, 2009). Cette interaction SP – SM nécessaire à un MCO optimal requiert ainsi, dès les phases d'ingénierie, de définir des exigences et des contraintes bilatérales entre les cycles de développement du SP et de ses systèmes contributeurs et plus spécifiquement celui du SM.

Par exemple, certaines exigences du SP (e.g. disponibilité) induisent des exigences sur le SM (e.g. MTTR-MTBF pour garantir le niveau de disponibilité) et des exigences sur le SM contraignent également les exigences du SP (e.g. la fiabilité d'un équipement va impacter la qualité des produits).

Dans cette vision système, le SM a lui aussi, par récursivité, un ensemble d'exigences et de contraintes à respecter en lien avec ses systèmes contributeurs propres tels que la logistique, les ressources humaines, etc. pour atteindre les objectifs fixés. Selon (Parida, 2006) ces exigences et contraintes pour le SM peuvent se représenter sous la forme d'indicateurs multicritères généralement notés indicateurs de performances clés ou KPI (Key Performance Indicators).

Le respect de ces différentes exigences aussi bien au niveau de l'interaction SP-SM qu'en interne au SM passe donc nécessairement par le choix d'une ou de stratégies de maintenance adaptées à la satisfaction de ces KPIs. Cette procédure de choix dans l'objectif de prise de décision est, dans la plupart des cas, basée sur des modèles permettant d'évaluer les stratégies de maintenance à partir d'une quantification du plan de maintenance et de l'organisation associée. (Wang, 2002), par exemple, introduit dans ces modèles plusieurs paramètres comme la nature de l'intervention, la fréquence, les conditions de réalisation des interventions (FD X 60-000, 2002) ce qui permet de comparer différentes stratégies en calculant les KPIs et de calculer l'écart entre les performances « prédites » et les objectifs visés.

Cependant par rapport à des systèmes opérants de plus en plus complexes, où logiquement les solutions de formalisation analytiques ne sont plus possibles (Wang et al., 2007), l'évaluation de stratégies de maintenance soulève un verrou scientifique majeur qui est de disposer d'un modèle pertinent et « exécutable » représentatif de l'ensemble des connaissances disponibles sur le système (fonctionnel, dysfonctionnel, etc.) en y intégrant les paramètres caractéristiques de chacune des stratégies et en y formalisant, de façon holistique, l'impact de ces paramètres sur les KPIs à la fois du SP et du SM dans une vision MCO.

La contribution développée dans le cadre de cette thèse cherche donc à apporter une première réponse scientifique à ce verrou en proposant une méthodologie permettant d'évaluer, sur la base du calcul d'un ensemble d'indicateurs, si les stratégies (ainsi que l'organisation de maintenance envisagée), sont capables de satisfaire les exigences requises du SP et de ses systèmes contributeurs principalement le SM (processus d'estimation des performances de maintenance dans la phase de conception ou d'exploitation). Ce travail a été développé dans le cadre de l'ANR – SKOOB¹ en exploitant les problématiques de maintenance définies par les industriels de ce projet (i.e. système complexe de type centrale de production d'électricité) et en basant la partie « modèle exécutable » de cette méthodologie sur une technique de type PRM (Probabilistic Relational Model) (Pfeffer A., D. Koller, 1999). En effet l'objectif majeur de SKOOB était d'intégrer des aspects de modélisation orientée objet au formalisme classique des réseaux bayésiens afin de faire progresser l'outil BayesiaLab². Les problématiques en maintenance de ce projet ont permis aussi de faire émerger, par rapport au verrou scientifique initial, le besoin de disposer de modèles génériques, réutilisables plus adaptés dans une logique de réduction des coûts et du temps de développement des modèles (Projet SKOOB, 2011). En ce sens, le PRM est une extension des réseaux bayésiens permettant une représentation structurée et modulaire, dans notre cas, sous la forme de « motifs génériques » ou patterns instanciables et assemblables, qui facilite la construction et l'évolution du modèle d'évaluation de stratégies de maintenance tout en rendant l'inférence possible. Les PRM supportent donc la modélisation structurée de type orientée objet, permettant de représenter, sous la forme de motifs, les variables décisionnelles du SM et de ses principaux systèmes contributeurs afin d'évaluer l'impact des actions de maintenance sur les composants et sur les performances du SP. Le PRM est supporté par un langage de modélisation nommé « Skool » issu du (Projet SKOOB, 2011). Nous avons contribué au développement de Skool afin de garantir que son pouvoir expressif permet de supporter toute modélisation nécessaire à l'évaluation des stratégies de maintenance.

Ainsi, le cœur de notre méthodologie est un modèle générique « exécutable » (pour permettre l'évaluation) qui intègre les différentes interactions du SM avec ses systèmes contributeurs, l'impact de différentes stratégies de maintenance sur le calcul des indicateurs et l'intégration de connaissances de diverses natures du SP et SM (à la fois qualitative pour les analyses organisationnelles et humaines mais aussi quantitative pour les analyses techniques).

¹ <http://skoob.lip6.fr>

² <http://www.bayesia.com/>

En ce sens, les originalités majeures des travaux de thèse sont :

- de considérer le système (opérant) étudié au sein d'une ingénierie système requérant de formaliser de façon similaire (sur les mêmes principes de structuration) dans le modèle d'évaluation non seulement les connaissances du système (SP) issues de ses multiples points de vue mais aussi celles de ses systèmes contributeurs et principalement celles du système maintenance.
- de proposer une unification des connaissances sur la base de PRM dont les propriétés sont bien adaptées à la complexité des systèmes à modéliser et de disposer d'un langage Skool support au PRM.
- de construire, à base de PRM, tout un ensemble de motifs génériques (patterns) «instanciables et interconnectables » et qui représentent les relations entre « paramètres de stratégies » (par exemple l'organisation de la maintenance, le plan de maintenance etc.) et « paramètres du SP et du SM». Ces motifs sont stockables en bibliothèques (composants sur étagère, COTS) et utilisables pour définir un modèle particulier à partir d'une phase d'instanciation des motifs au cas spécifique.

Cette contribution est développée et justifiée au sein de ce manuscrit à travers 5 chapitres.

Dans le premier chapitre, un état de l'art est réalisé sur les différents critères qui ont été pris en compte pour le développement de modèles permettant l'évaluation quantitative des stratégies de maintenance. Parmi ces critères, il a été considéré non pas des systèmes mono-composants mais plutôt des approches qui traitent la complexité issue des systèmes multi-composants. Aussi nous avons analysé les critères de performances évalués pour définir les choix en maintenance ainsi que la façon d'intégrer au-delà des aspects techniques (e.g. les défaillances des composants, fréquences des interventions), des aspects humains et organisationnels qui impactent également les performances du SP et du SM. De cela, a été mis en évidence principalement la nécessité (1) de prendre en compte des connaissances de diverses natures (qualitative et quantitative) issues du plan de maintenance et des interactions entre les différents systèmes contributeurs au SP et au SM et de l'intégration des relations et dépendances des éléments constituant le SP et le SM, (2) de développer un modèle générique qui facilite la capitalisation de connaissance et finalement (3) de considérer dans le modèle des performances multicritères et multi-niveaux.

Sur la base des besoins en modélisation sous-jacents aux éléments mis en évidence dans le premier chapitre, le deuxième chapitre porte sur la proposition d'une méthodologie qui formalise à travers des modèles métiers (Vernadat, 1996), les connaissances d'un plan de maintenance et de son organisation, ainsi que les interactions entre le SP et le SM. La complexité et l'interaction entre les systèmes sont traitées en s'appuyant sur la théorie du système général (Bertalanffy, 1976) permettant la représentation d'un système à travers différents points de vue cohérents et complémentaires. Pour ce faire nous utilisons différents modèles supports à la structuration des connaissances comme SADT pour la vue fonctionnelle, le diagramme de classe pour la vue informationnelle, etc. auxquels sont intégrés des principes sémantiques de construction pour en faire des modèles métiers plus adaptés à notre contexte d'étude (SP, SM, SP/SM). Ainsi la modélisation des connaissances multi-points de vue permet de fonder les relations de dépendances entre les différentes variables d'un plan de maintenance et les impacts de ces relations sur les

performances globales du SP. Ces fondements aboutissent à la définition d'un ensemble de règles sémantiques facilement transposables dans un format quantifiable et exécutable sur lequel se construirait le modèle d'évaluation des stratégies.

En ce sens, le troisième chapitre a pour objet, à partir des règles sémantiques définies au chapitre 2, de créer tout un ensemble de motifs génériques, modulables et exécutables construits à base de PRM. Ces motifs supportent donc les relations de dépendances entre différentes variables impactant l'évaluation de stratégies, qui sont spécifiées dans les modèles métiers tout en permettant d'unifier les connaissances au sein d'un même modèle. La construction à base de PRM offre une grande modularité et flexibilité dans l'évolution du modèle puisqu'un motif peut être changé en modifiant uniquement la partie concernée du modèle.

Dans le quatrième chapitre, une méthodologie pour le paramétrage des motifs génériques est proposée pour faciliter le déploiement futur de la démarche sur des cas industriels réels. En ce sens, cette méthodologie de paramétrage est construite en tenant compte des données terrains collectés par les industriels, principalement de SKOOB, de façon à ce que cela corresponde à une certaine réalité dans un passage à l'échelle.

Finalement, dans le cinquième chapitre, les contributions formalisées aux chapitres précédents sont mises en œuvre sur un cas applicatif industriel permettant d'illustrer, suite à un passage à l'échelle, la faisabilité de l'approche globale, de valider la pertinence des motifs proposés mais aussi d'évaluer la valeur ajoutée d'une telle approche. Ce cas applicatif porte sur un processus de fabrication de ferment où il y a des fortes restrictions au niveau de la sécurité sanitaire des produits. Pour valider le modèle issu de l'application de la méthodologie proposée, quatre scénarios de simulation sont proposés : les deux premiers proposent d'évaluer différents types de stratégies de maintenance et les deux derniers prennent en compte l'impact des autres variables associées à un plan de maintenance (comme la logistique et l'efficacité du collectif de travail) sur les performances du SP et du SM. Cette mise en application est assez complexe pour confronter notre approche à un passage à l'échelle pertinent avec un véritable besoin d'évaluation de stratégies de maintenance.

Enfin ce mémoire se termine par une conclusion et l'élaboration d'un ensemble de perspectives principalement basés sur les résultats obtenus lors du déploiement de notre contribution sur le cas industriel.

Chapitre 1

Evaluation de l'impact des stratégies de maintenance : Un besoin essentiel pour la maîtrise des performances globales d'une entreprise

1.1. Introduction

La pérennité des entreprises industrielles est liée, aujourd'hui, non seulement à la maîtrise des performances classiques vis-à-vis du produit/service qu'elle délivre mais aussi de tout un ensemble d'exigences opérationnelles (i.e. sûreté, sécurité, réduction de la pollution...) requises pour répondre aux nouveaux contextes social et environnemental dans lesquels elles opèrent.

Ces performances se déclinent à tous les niveaux de l'entreprise, c'est-à-dire aussi bien sur un niveau décisionnel qu'informationnel ou opérant. Au niveau du système opérant (considéré dans nos travaux comme le système principal (SP)), son Maintien en Condition Opérationnelle (MCO), à travers plus spécifiquement le système de maintenance (SM), joue un rôle essentiel pour l'amélioration de ces exigences et performances. En effet, le SM permet de rétablir, maintenir par les activités qu'il met en œuvre, le bon fonctionnement du système principal (SP).

Pour assurer le MCO, les responsables de maintenance doivent donc être capables de choisir les stratégies de maintenance et les ressources à mettre en œuvre les plus adaptées. Ce choix est basé sur des méthodes d'évaluations de stratégies de maintenance ayant pour objectif de prédire, dès la phase de conception du SM, les performances d'un plan de maintenance (le plan comprend les stratégies de maintenance plus les ressources) au regard du SP. Par rapport à cette dualité SP-SM, dans ce chapitre, nous présentons le contexte d'évaluation des stratégies ainsi que les critères associés (comme par exemple : la nature des actions, les interactions avec d'autres systèmes contributeurs...). Cela permet de positionner la problématique de la création de modèles permettant ces évaluations, de définir les limites des approches existantes, d'identifier les verrous scientifiques actuels et de proposer une première orientation scientifique, qui nous est propre, aux verrous identifiés.

1.2. Vers la performance globale de l'entreprise à travers le maintien de la performance du système de production opérant

1.2.1. Performances globales d'un système industriel

Une entreprise industrielle est une entité qui utilise une combinaison de moyens humains, matériels, financiers et de services pour transformer un « produit » ou matière entrante vers un « produit » fini ou sortant (produit est à comprendre au sens général d'objet ou de service).

Par rapport à ce produit, l'entreprise doit satisfaire des besoins exprimés par des parties prenantes. Chacune des parties prenantes possède des objectifs différents, par exemple du point de vue client, l'objectif est d'obtenir un produit au moindre prix et de qualité maximale; du point de vue manager, l'objectif est de minimiser les coûts et maximiser la productivité; et du point de vue opérateur le but est de travailler dans un environnement sûr, agréable et stimulant (Longo et Motta, 2006).

Globalement les parties prenantes évoquent principalement des exigences de performances « financières » classiques orientées vers la réduction des coûts, la maximisation des bénéfices, l'augmentation de la productivité, etc. (De Toni et Tonchia, 2001). Néanmoins, à partir des années 90, les réglementations au niveau environnemental et l'importance de la responsabilité sociale créée par le contexte mondial sociopolitique et socio-économique (UNWECD, 1987) ont fait évoluer la notion de performances dans les entreprises.

Cette évolution repose principalement sur une prise en compte de performances « non-financières » (e.g. la sécurité, l'impact écologique et sociétal) dans un contexte de développement durable. Ces performances sont considérées en ingénierie système comme des exigences opérationnelles. Selon (Kleindorfer, 2005) le développement durable peut être défini comme une fonction de trois variables : financier (profit), social (les personnes) et environnemental (la planète) (Figure 1).

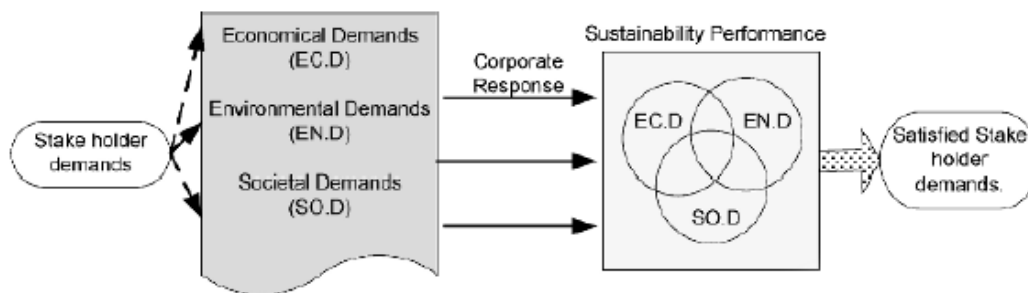


Figure 1. Performance orientée vers le développement durable (Kleindorfer, 2005)

Avec cette nouvelle vision, les entreprises cherchent donc à satisfaire différentes exigences et performances parfois antagonistes (i.e. coûts global et minimisation des risques d'accident). La satisfaction de ces exigences et performances se décline sur l'ensemble des processus de l'entreprise. Ces processus sont organisés sur trois niveaux : niveau décisionnel, informationnel et opérant (Figure 2) chacun matérialisé par des architectures (Mateos, 2000) :

- Le niveau décisionnel considère les décisions sur la gestion de l'entreprise depuis la conception du produit jusqu'à sa commercialisation. Ce niveau est supporté par des progiciels de type ERP (Enterprise Resource Planning), qui intègre les principaux processus de gestion de l'entreprise comme la gestion commerciale, la logistique, la gestion de ressources humaines, la comptabilité...
- Le niveau informationnel se focalise sur l'organisation à moyen terme du processus de production. A ce niveau, l'ordonnancement de la production est réalisé ainsi que leur suivi en temps réel. Le système informatique MES (Manufacturing Execution System) supporte

ces activités en autres, par la création d'ordres de production, le contrôle de la qualité ainsi que la traçabilité de la production.

- Le niveau opérant intègre le déroulement des activités planifiées. Elles sont mises en place, exécutées et contrôlées (à travers des actionneurs, des capteurs, etc.) afin de transformer la matière entrante en produits finis.

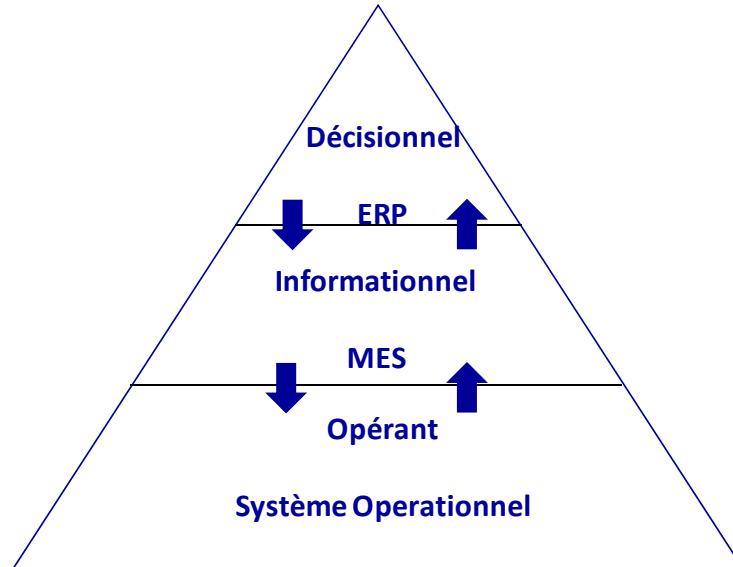


Figure 2. Niveaux organisationnels d'une entreprise

Par rapport au contexte industriel de cette thèse (projet SKOOB), nous nous focalisons plus spécifiquement sur le système opérant, c'est-à-dire le système qui réalise les transformations des flux entrants vers des flux sortants ou produits finis. Le système opérant est une combinaison d'interactions entre des éléments organisés afin d'atteindre un objectif (INCOSE, 2010). En se basant sur les concepts défendus en ingénierie système, dans la suite nous considérons le système en étude (système opérant) comme le système principal (SP). En ce sens les exigences et performances de l'entreprise sont supportées, en majeure partie, par les exigences propres du SP (AFIS, 2009) ce qui justifie l'étude de ses caractéristiques ainsi que des systèmes « proches » qui concourent à sa réalisation.

1.1.1. Caractéristiques du SP

Pour mettre en œuvre les fonctions du SP, un ensemble de systèmes supports sont à déployer. Parmi ces systèmes se trouvent des systèmes de développement du SP, de fabrication, de vente, de soutien et de recyclage.

Dans cette vision système, un des enjeux actuel est donc d'étudier le SP dans toute sa complexité et sa dynamique de changement en intégrant les différentes interactions avec ses systèmes supports (Projet SKOOB, 2011). En ce sens, le SP pour (Rechtin, 2006) consiste en un regroupement d'éléments (pouvant être des personnes, équipements, logiciels, politiques, installations et documents) en interaction dans le but de travailler ensemble pour obtenir des résultats qui ne sont pas atteignables avec un seul de ces éléments. Ces différentes interactions peuvent rendre un système très complexe en termes d'activités à faire, de variables décisionnelles à considérer et de relations entre les différentes variables qui le composent (Vernadat, 1996).

Il est nécessaire de maîtriser cette complexité afin de contrôler les exigences attendues, par exemple, au niveau de la gestion des risques (nécessaires dans tous les SP, que cela soit l'industrie nucléaire, l'industrie agroalimentaire, les organisations sanitaires et sociales, etc). Celle-ci constitue un enjeu prioritaire dans les entreprises industrielles afin d'éviter des catastrophes (e.g. rejets de matériels radioactifs, contamination d'aliments ou sang contaminé).

Aujourd'hui cependant l'explication de ces événements redoutés (i.e. ces risques) est souvent réduite à l'analyse de l'architecture technique du SP. Cette simplification est devenue trop restrictive par rapport à l'importance des facteurs humains sur les performances du SP (Léger et al. 2009). Il faudrait prendre en compte simultanément à minima l'interaction entre l'architecture technique du SP et son système contributeur « humain ». La maîtrise des facteurs humains demande donc une modélisation qui intègre différents types de connaissance de diverses natures (qualitative ou quantitative, niveau d'abstraction différent,...). L'aspect humain est principalement de nature qualitative (connaissance représentée sur la forme d'AMDEC, HAZOP, APR...), alors que les aspects techniques sont de nature plus quantitative (e.g. taux de défaillance, indisponibilité, MTTF, etc.) (Røed et al. 2008). Cette diversité de facteurs rend les modèles produits particulièrement complexes, en plus d'être compliqués.

De plus de nouvelles technologies ont émergé pour piloter et surveiller les activités du SP. Ces nouvelles technologies augmentent le degré de complexité des installations. Elles amènent à des systèmes très interdépendants, tels que les systèmes d'observation, le système de communication et le système de conduite du SP (Nakagawa, 2008).

Pour intégrer les différents types de connaissance ainsi que pour faire face à cette complexité, il est nécessaire de créer des modèles de grande taille, capables de représenter le comportement du système (Filip et al., 2009). La création de ces modèles est difficile puisqu'il n'existe pas de méthodologies qui guident la construction des modèles. De plus, cette activité engendre des coûts d'études assez importants par manque de capitalisation de connaissances et de réutilisation de ces modèles selon des constats réalisés par les partenaires du projet SKOOB.

La création des modèles sur le comportement du SP doit permettre de maîtriser et contrôler les exigences de performances du SP et ceci dans une orientation cycle de vie avec une focalisation sur la phase essentielle de MCO. Il est également nécessaire de considérer dans ces modèles l'interaction du SP avec d'autres systèmes d'une entreprise industrielle.

1.1.2. La maintenance pivot du MCO

Par rapport aux exigences de performance globale, des exigences en sûreté de fonctionnement comme les caractéristiques de disponibilité (liées au taux de production et à la performance économique), de fiabilité (liées aux conditions de sécurité dans le travail (performance sociale)) et à la pollution (performance environnementale)) sont essentielles. Ainsi le Maintien en Condition Opérationnelle (MCO), garantissant le bon fonctionnement du système et son adaptation aux évolutions nécessaires (AFIS, 2009), joue un rôle primordial. Le MCO est principalement matérialisé par un des systèmes contributeurs au SP qui est le système de soutien. Pour cela le système de soutien compte avec un ensemble d'éléments supports. Ces éléments sont appelés éléments de soutien logistique. Ils mettent en place un ensemble de processus et de moyens pour le maintien en condition opérationnelle (MCO) du SP (Figure 3).

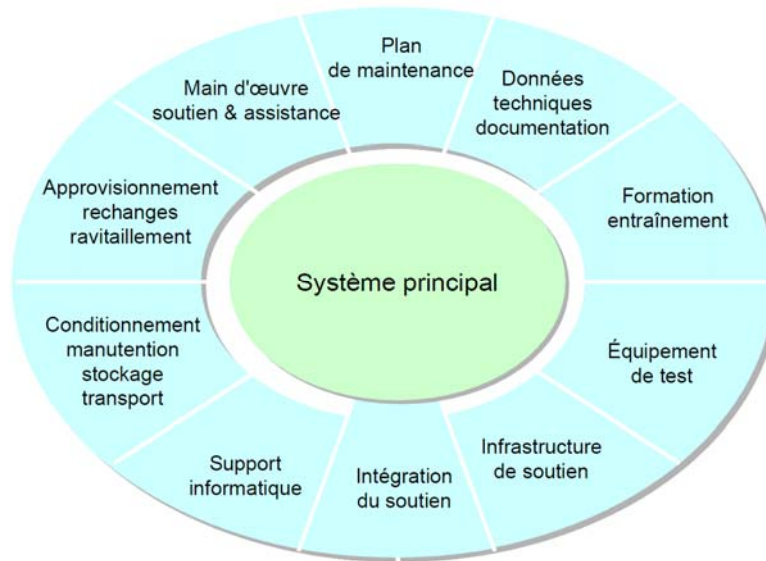


Figure 3. Eléments du soutien logistique (AFIS, 2009)

Le soutien logistique intègre certains systèmes contributeurs au SP, entre autres le système de logistique et approvisionnement, de ressources humaines, le support informatique, le conditionnement, manutention et stockage... Un système essentiel dans le soutien logistique est le Système de Maintenance (SM) qui permet de garantir des performances telles que la disponibilité, la productivité, etc. (Alsyouf, I. 2007) (Figure 4).

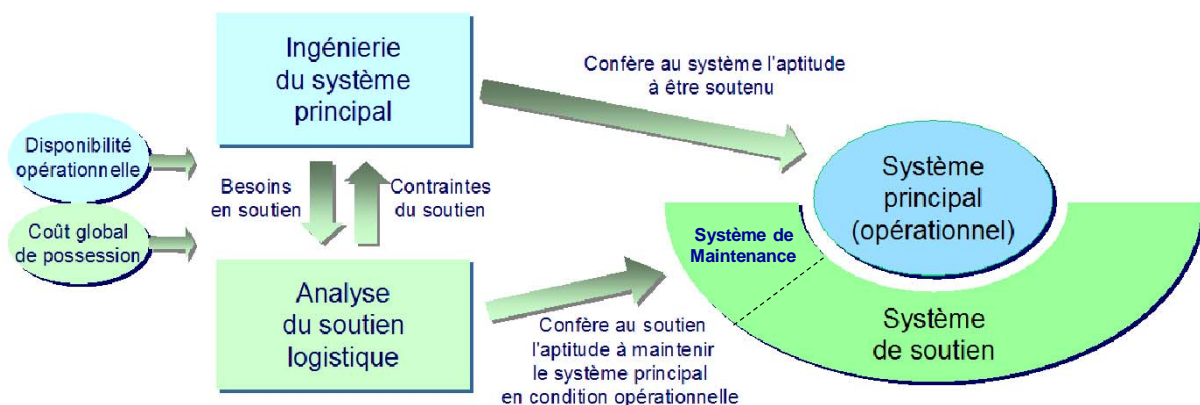


Figure 4. Interactions entre le SP et ses systèmes de soutien logistique (et SM)

En ce sens, lorsque les performances du SP sont dégradées/défaillantes (par exemple une diminution de rendement dans le processus de production) le SM restaure les fonctionnalités du SP... en impactant ainsi sa disponibilité, sa fiabilité, sa productivité, etc. Le SM organise l'ensemble d'actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie des biens, destinées à les maintenir ou à les rétablir dans un état dans lequel ils peuvent accomplir les fonctions requises (Norme FD X 60-000, 2002), (AFIS, 2009).

Le SM possède également ses propres performances tels que les coûts, la productivité, une disponibilité, etc. Comme il permet de soutenir le SP, les niveaux de performances du SM ont une incidence sur les performances du SP. Par exemple, si le personnel de maintenance n'est pas

disponible et un composant critique du SP tombe en panne, alors le SP ne pourra pas remplir sa fonction jusqu'à ce que le personnel du SM soit disponible et puisse remettre en fonctionnement le composant. Dans ce sens, le SM contribue à la satisfaction des exigences du SP comme par exemple :

- La qualité produite puisqu'un composant dégradé ne remplit pas correctement sa fonction et augmente les risques de produire un produit dégradé (hors qualité) (Raouf, 2004).
- La productivité en agissant sur la restauration du système suite à une défaillance ainsi que sur sa disponibilité (Swanson, 2001).
- Les coûts de maintenance puisque selon (Mobley, 1990) ces coûts représentent entre 15-40% des coûts de production. Ainsi une bonne gestion de la maintenance peut représenter des réductions de coûts importantes pour l'entreprise.
- La garantie de la sécurité puisque le manque de maintenance peut conduire à la défaillance des composants et ainsi à l'enchaînement d'événements pouvant causer des accidents majeurs (Pintelon et Muchiri, 2009).
- La préservation de l'environnement puisque la maintenance contribue à maintenir les composants critiques en bon état, améliorant ainsi les rendements au niveau énergétique et préservant les matériaux tout au long de leur cycle de vie (Alting et Legarth, 1995).

Ainsi la maintenance est présentée comme un système support essentiel pour remplir les exigences du SP. Le SM supporte le SP dans la phase opérationnelle et dans la phase de retrait de service. De plus, il est également contraint par les choix sur les aspects liés à la maintenabilité durant la phase de conception. Pour satisfaire ces exigences dans un contexte de performance globale, l'interaction entre ces deux systèmes doit donc être prise en compte dès la phase de conception jusqu'à la phase de retrait de service permettant l'intégration du SM à l'ensemble du cycle de vie du SP.

1.1.3. La maintenance tout au long du cycle de vie

Le cycle de vie du SP est constitué de trois phases principales : la phase de conception (et fabrication), la phase d'exploitation et la fin de vie du système. Dans la phase de conception les caractéristiques et les paramètres du SP sont spécifiées puis le SP est fabriqué. Après sa fabrication, le système est exploité pour satisfaire les demandes des clients. Lors du retrait du système, le système est démantelé et, si possible, réutilisé ou recyclé. Le SM interagit avec le SP afin de supporter les performances du SP à travers chacune de ces phases (AFIS, 2009) (Figure 5).

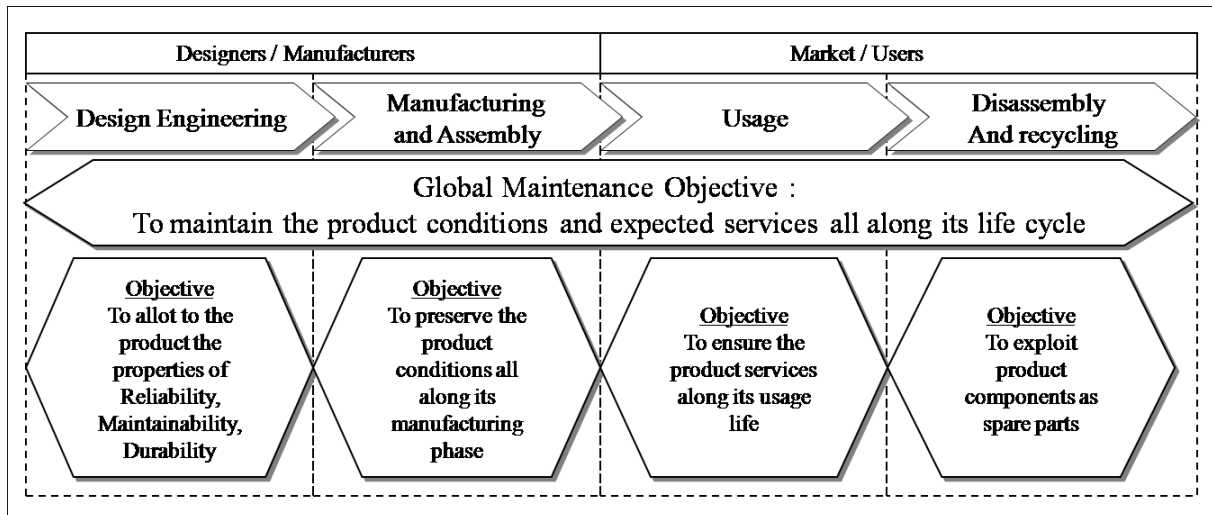


Figure 5. La maintenance, tout au long du cycle de vie du système de production (Levrat, *et al.*, 2008).

1.1.3.1. Interactions SP-SM dans la phase de conception

Le SP doit être conçu pour être capable de remplir sa fonction, tout en s'adaptant à différentes conditions d'exploitation selon différents contextes et les nécessités du marché en optimisant les coûts. Dans ce sens, des méthodes comme le « Life Cycle Cost » cherchent à quantifier les coûts du système total (SP + systèmes contributeurs) tout au long du cycle de vie, permettant d'observer la relation entre des paramètres de conception et leurs impacts au niveau économique (Durairaj et al., 2002). Cela introduit des interactions entre les ingénieries du SM et du SP en relation avec certains critères relatifs à la facilité de démontage, facilité de transport, utilisation des matériaux renouvelables, etc., même dans une phase de fin de vie (Alting et Legarth, 1995).

L'objectif est donc de concevoir et de fabriquer le SP et son système de soutien (et donc le SM) dans une vision de performance globale. Il faut donc considérer l'impact du SP sur la conception du SM mais également l'impact du SM sur le SP, entraînant des opérations de reconception du SP. Par exemple dans l'impact du SP sur la conception du SM, il est possible de faire le choix de changer de type de stratégie de maintenance ou de modifier les paramètres de cette stratégie pour accomplir les objectifs du SP. Dans le cas inverse, (l'impact du SM sur le SP) il est possible de décider de continuer avec la même stratégie de maintenance mais en modifiant la conception du SP (e.g. changer le type ou la marque du composant parce que le coût de remplacement est trop élevé).

Pour répondre à ces interactions, le soutien logistique intégré (SLI) regroupe l'ensemble des éléments nécessaires pour optimiser le service rendu et le coût total du cycle de vie (du SM et SP), c'est-à-dire les éléments qui garantissent le MCO du système (AFIS, 2009).

De plus, comme le SP, le SM interagit aussi avec d'autres systèmes telle que la logistique, la qualité, les ressources humaines, les achats, etc. Le SM n'impactera pas que le SP mais aussi la conception de ses propres systèmes contributeurs, tels que le système de

logistique, système d'information et communication, etc. Par exemple, le SM impacte sur la conception du système de logistique, par le choix des stratégies d'approvisionnement afin de remplir les objectifs du SM. Inversement, c'est la stratégie d'approvisionnement qui peut être conservée (e.g. parce que les coûts de stockage se minimisent) et la conception du SM est modifiée par le changement du type de stratégie de maintenance afin de s'adapter au mieux au système de logistique.

Selon (Parida, 2006) ces exigences et contraintes pour le SM peuvent se représenter sous la forme d'indicateurs multicritères qui englobent des aspects de maintenance, processus, sécurité, etc. et multi-hiérarchiques (pour les trois niveaux organisationnels : opérationnel, tactique et stratégique) afin de mieux maîtriser l'impact de la maintenance tout au long du cycle de vie du SP.

Les stratégies de maintenance doivent ainsi être définies pour atteindre les performances du SM et du SP tout au long du cycle de vie. Dans la phase de conception, leur définition impose aussi des interactions entre les exigences des divers systèmes contributeurs du SM. Les stratégies de maintenance permettent de relier la phase de conception avec la phase d'exploitation du SP. Elles intègrent donc des paramètres du SP et ses missions pour établir des choix au niveau du type de maintenance, de la technologie et des moyens nécessaires à leur mise en place, etc. (Takata et al., 2005).

1.1.3.2. Interactions SP-SM dans la phase d'exploitation

Suite à la phase de conception, le SP est construit et mis en opération. Simultanément à la mise en œuvre du SP, le SM met en place les actions techniques et administratives destinées à maintenir ou rétablir le système en conditions opérationnelles afin de remplir les fonctions requises (Norme CEI 60300, 2004). La maintenance doit aussi assurer le maintien en bon fonctionnement du SP pour qu'il consomme le moins d'énergie possible, minimisant ainsi l'impact sur l'environnement et permettant de travailler dans des conditions sûres.

Durant cette phase, les stratégies de maintenance définies sont appliquées au SP afin de supporter la réussite de sa mission. De cette façon, il est possible de comparer les performances prévues dans la conception (performances « attendues ») et celles de la période de fonctionnement (performances « obtenues »), pour identifier de possibles déviations. Ces déviations sont l'objet de diagnostic pour identifier leurs causes et ces causes deviennent des points de départ pour l'amélioration des performances des deux systèmes (SP et SM) (Takata et al., 2005).

1.1.3.3. Interactions SP-SM dans la phase de fin de vie du SP

Tout au long du cycle de vie du SP, le SM maintient les conditions des composants pour préserver l'intégrité du SP afin de rendre les matériels réutilisables. La maintenance permet de surveiller le niveau de dégradation d'un composant afin de décider du moment opportun du retrait de ce composant. De cette façon le composant peut ensuite être réutilisable sur d'autres applications à travers un reconditionnement ou, si cela n'est pas possible, un recyclage (Jayal et al., 2010) (Jayantha et al., 2009).

En conclusion, le SM permet de garantir et rétablir les fonctionnalités du SP tout au long de son cycle de vie, en impactant ses performances tels que la maximisation sur les bénéfiques et la préservation de l'environnement et de la sécurité. Pour supporter le SP, les responsables de maintenance doivent faire des choix comme le type de tâches qui seront effectuées, quand elles seront réalisées, comment elles seront effectuées, quel niveau d'intervention elles auront, etc., dès la phase de conception afin de mettre en place des stratégies maintenance pertinentes (Figure 6). Cela joue dans les choix d'une stratégie.

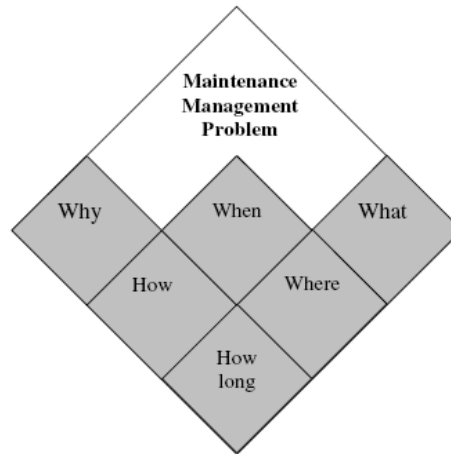


Figure 6. Les éléments relatifs au développement d'une action de maintenance (Knezevic, *et al.*, 1997)

1.2. Les stratégies de maintenance

Les stratégies de maintenance comprennent la définition de la nature de tâches de maintenance (cette nature est définie en fonction de sa réactivité vis-à-vis de la dégradation/défaillance des composants), ainsi que les procédures et les ressources pour exécuter ces tâches.

Les stratégies de maintenance intègrent des choix pour mettre en place un plan de maintenance. Les responsables de maintenance doivent définir les stratégies de maintenance et les ressources à mettre en œuvre pour atteindre les objectifs de production, en définissant les aspects :

- gamme des tâches de maintenance,
- organisation des équipes de maintenance,
- internalisation et/ou externalisation des tâches,
- gestion des stocks de pièces de rechanges et matériels consommables,
- gestion des ressources humaines, (Norme FD X 60-000, 2002).

Dans la gamme des tâches de maintenance il est nécessaire de faire des choix par rapport à la réactivité du SM pour restaurer les fonctionnalités du SP. En ce sens il existe des actions qui anticipent les défaillances, ces sont des actions de type préventif ou des actions plus réactives qui se déclenchent lors de la défaillance, ces sont des actions correctives (Figure 7-A). De plus il existe des actions qui visent la rationalisation des coûts dans le cadre de la maintenance d'un

système multi-composants, la maintenance opportuniste (Figure 7-B). Elle se déclenche lorsqu'une action sur un autre composant est réalisée. Ces stratégies sont détaillées dans la section 1.3.2.

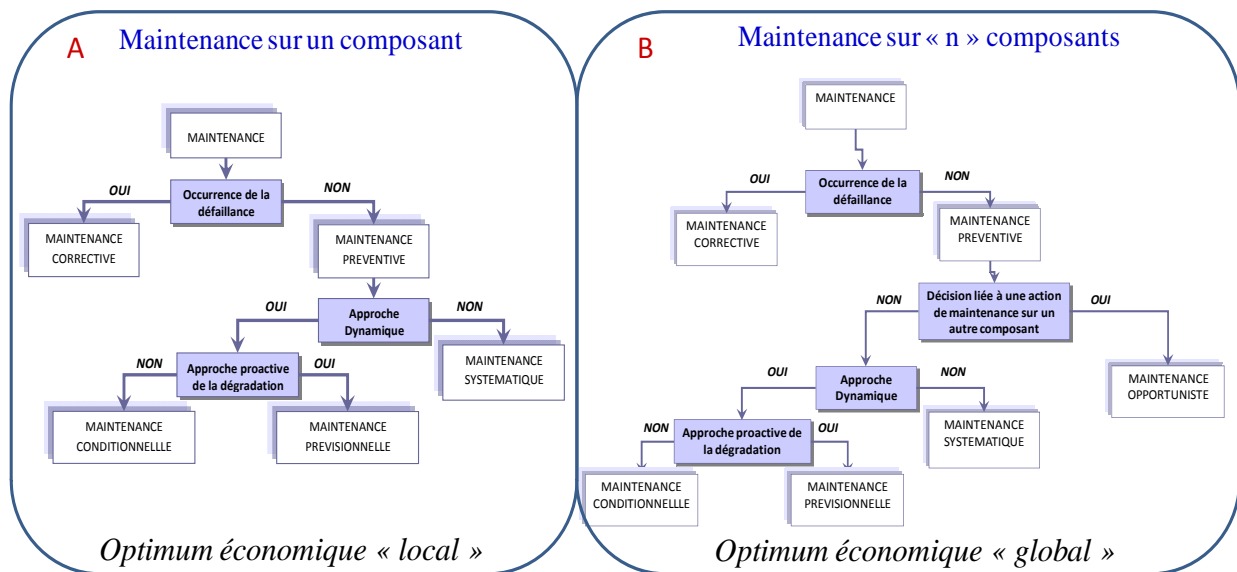


Figure 7. Les différentes stratégies de maintenance (Léger, 1999)

Ces choix déterminent les performances du SM et donc du SP, comme la capacité du SM d'anticiper certains événements non-souhaités, la disponibilité du SM pour supporter le SP quand il en a besoin et les coûts qu'il engendrera. Pour faciliter la prise de décision sur ces choix, il est nécessaire de définir des critères de sélection de tâches et de leur fréquence, sachant que chacun de ces choix a des impacts différents au niveau des performances (Al-Najjar et Alsyouf, 2003); (Wang et al., 2007).

1.2.1. Les méthodes de sélection des stratégies de maintenance

Généralement, la sélection d'une stratégie de maintenance se fait sur la base des critères caractéristiques de l'impact du SM sur les performances du SP. (Okumura et Okino, 2003) se sont basés sur des critères de pertes de production et de coûts. (Sharma et al., 2005), (Al-Najjar et Alsyouf, 2003) ont élargi le spectre en considérant les décisions de maintenance comme des décisions multicritères avec des critères relatifs à la criticité des défaillances comme la sécurité, l'impact sur l'environnement, etc. L'analyse de cette criticité donne naissance à des méthodologies de définition des stratégies de maintenance comme la « Maintenance Basée sur la Fiabilité » (MBF), où les tâches de maintenance et leur fréquence sont définies en fonction de la criticité associée aux défaillances. D'autres outils, comme le « Processus Hiérarchique Analytique » (PHA) permettent de comparer les différentes alternatives en fonction des priorités établies pour les différents critères de performances (Bevilacqua et Braglia, 2000). Des techniques de comparaison par paires de critères sont également utilisées telles que le Processus de Réseaux Analytique (Cheng et Tsao, 2010) et des Problèmes d'affectation (Bashiiri et al., 2011).

Dans un objectif de maîtrise des performances dans les phases de conception et d'exploitation du SP, ces stratégies nécessitent des phases d'évaluation de critère pour quantifier (de manière prévisionnelle) les performances d'un plan de maintenance (Swanson, 2001).

1.2.2. Les évaluations des stratégies de maintenance

L'évaluation permet de déterminer, dans une phase de conception ou reconception du SM, l'écart entre les objectifs de la maintenance établis au niveau stratégique de l'entreprise et les performances obtenues lors du déploiement ou de sa simulation (mise en place des moyens et stratégies-Figure 8) (Crespo, 2008).

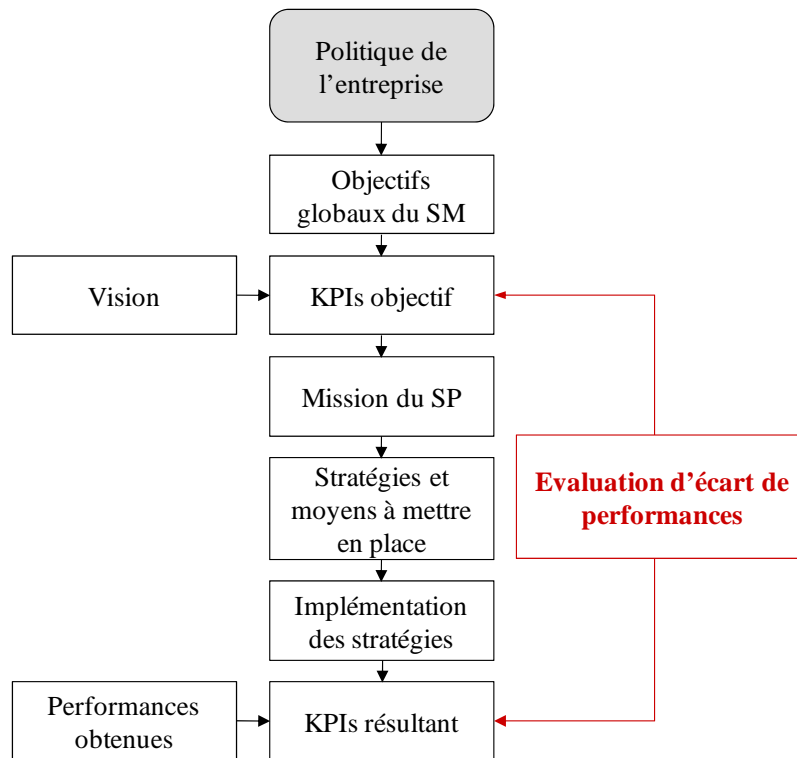


Figure 8. Processus d'évaluation de stratégies de maintenance (Crespo, 2008)

Un modèle de simulation pour des évaluations des stratégies de maintenance permet d'anticiper ou pronostiquer les performances du SP et du SM dans la phase de conception (ou de reconception du SM) avant leur mise en place. De cette façon il est possible d'estimer l'impact de certains choix comme le choix de la fréquence d'interventions sur les performances des systèmes (SM et SP).

Une évaluation des stratégies de maintenance est définie comme une méthode qui permet de caractériser les performances du SP et SM en fonction des choix réalisés. En ce sens, les évaluations utilisent des modèles qui permettent d'évaluer sur la base du calcul d'un ensemble d'indicateurs, si l'architecture fonctionnelle du SM et les stratégies de maintenance envisagées (définies notamment à travers le plan de maintenance et son organisation), sont capables de satisfaire les exigences requises par le SP et ses systèmes contributeurs (processus d'estimation des performances de maintenance dans la phase de conception ou exploitation) (Figure 9). Lorsque les objectifs ne sont pas atteints, la détection des causes les plus impactantes sur les déviations des exigences (quantifiées par des performances) du SP doit être réalisée (Norme FD X 60-000, 2002) (Crespo, 2008).

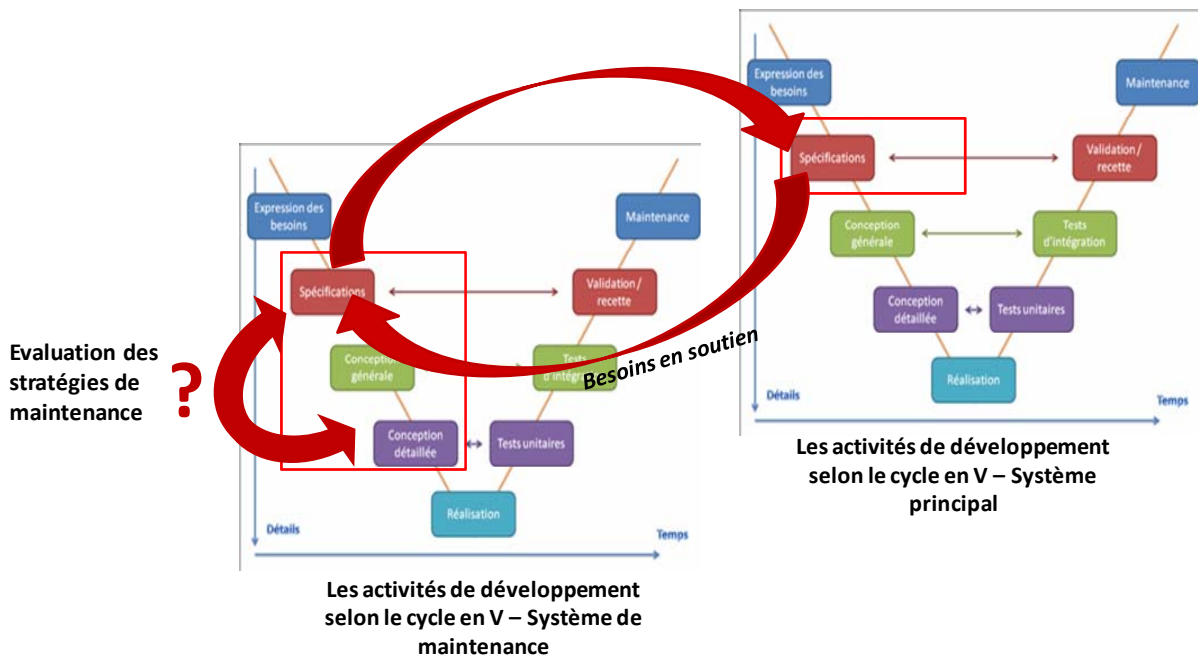


Figure 9. Interactions concernant l'évaluation des stratégies de maintenance entre les cycles en V du système principal et de maintenance

Dans ce but et afin de faciliter l'aide à la décision dans les phases de conception ou de reconception du SM, il est nécessaire de disposer de modèles pour évaluer les performances issues d'un plan de maintenance.

Toutefois, dans la littérature la plupart des travaux portant sur l'évaluation de la maintenance sont basés sur des modèles analytiques qui font des hypothèses simplificatrices peu réalistes comme la considération de systèmes mono-composant, par exemple, et visent une optimisation des coûts et de la disponibilité ou de la fiabilité (Dekker, 1996) (Wang, 2002). Ces modèles ne répondent pas totalement à la complexité d'un système industriel avec une diversité de composants, des interactions entre eux dans un contexte organisationnel donné.

En ce sens, vis-à-vis de systèmes complexes, de grande taille et qui intègrent de facteurs de diverses natures, il est possible de résumer les principales caractéristiques à modéliser pour évaluer les stratégies de maintenances qui supportent les activités du SP, sur les items suivants :

- les dépendances entre les composants (Lai, 2007) et (Cho et Parlar, 1991),
- les performances multicritères avec des critères pouvant parfois être antagonistes comme la disponibilité et les coûts. (Kiker et al., 2005) (Parida, 2006),
- les différents points de vue d'un système : fonctionnel, dysfonctionnel, financier, informationnel et organisationnel,
- les interactions du SM avec le SP ainsi qu'avec ses systèmes contributeurs,
- l'intégration des informations qualitatives et quantitatives à différents niveaux d'abstraction (Papazoglou et al. 2003) (Delmotte, 2003).

Ces caractéristiques engendrent la définition de critères relatifs aux choix de modélisation à prendre en compte dans les modèles qui permettent d'évaluer les stratégies de maintenance (Nowakowski et Werbinka, 2009). Ces critères sont synthétisés dans la Figure 10 et ils se résument en :

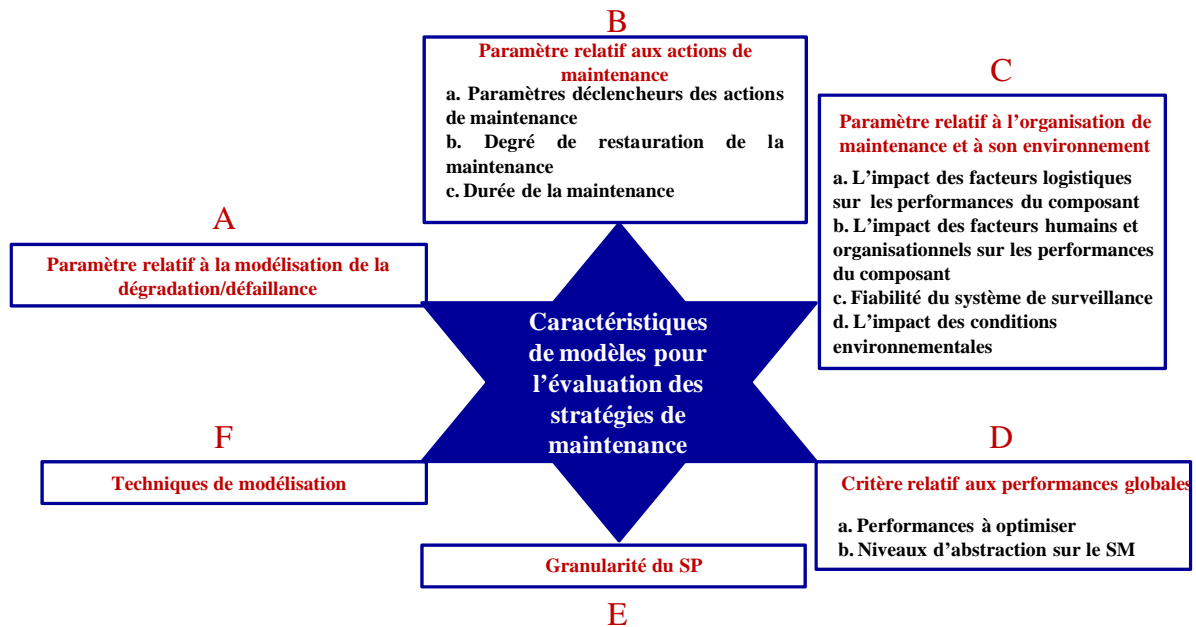


Figure 10. Critères relatifs aux choix de modélisation dans les évaluations des stratégies de maintenance

- Critères relatifs à la modélisation de la dégradation/défaillance : ce sont des critères liés à la modélisation des dysfonctionnements des composants.
- Critères relatifs aux actions de maintenance : ce sont des critères liés à la nature de l'intervention tels que les paramètres qui déclenchent les actions de maintenance, le degré de restauration du composant suite à une action de maintenance, la durée des actions...
- Critères relatifs à l'organisation de la maintenance et à son environnement : ces critères considèrent l'impact du facteur humain, du système logistique et la fiabilité du système d'observation sur les performances du composant (quand il existe) ainsi que l'impact des conditions exogènes aux choix de maintenance comme les conditions environnementales.
- Critères relatifs aux performances : ils font appel aux performances qui sont estimées pour réaliser la comparaison entre les différents choix dans la prise de décisions (tels que la disponibilité, la fiabilité et les coûts) et à quel niveau d'abstraction sont estimées les performances.
- Critères relatifs à la granularité du SP : ces critères comprennent certains choix de modélisation par rapport aux dépendances entre les composants, des relations fonctionnelles et les interactions entre le SM et le SP ainsi que les systèmes contributeurs. La modélisation peut être « simplifiée » pour des systèmes mono-composant ou « complexe » pour des systèmes multi-composants.

1.3. Les approches classiques des évaluations de stratégies de maintenance: étude de leurs critères caractéristiques

1.3.1. Critères relatifs à la modélisation de la dégradation/défaillance (Figure 10 – A)

L'une des caractéristiques principales à étudier sur les composants subissant le vieillissement est l'évolution de la dégradation ou l'apparition de défaillances au cours du temps. La dégradation est liée à l'altération d'une ou plusieurs caractéristiques physiques d'un composant (e.g. des fissures ou vibrations) et son aboutissement conduit à une défaillance. L'étude de ces phénomènes est l'une des connaissances nécessaires pour évaluer l'impact des stratégies de maintenance sur l'apparition d'événements non-désirables. Les travaux sur l'évaluation de stratégies de maintenance se sont focalisés principalement sur l'étude de défaillances. Celles-ci ont une nature aléatoire, il n'est donc pas possible de connaître avec précision leur instant d'apparition mais il est possible d'estimer leur probabilité d'occurrence à un moment donné à travers l'analyse de données de l'historique. Les modèles de base pour étudier la défaillance sont :

- Les distributions de probabilité, comme la loi exponentielle, loi Weibull, etc. qui utilisent des fonctions statistiques qui estiment la probabilité que la variable aléatoire de défaillance appartienne à un intervalle arbitraire (fonction de distribution de probabilité $F(t)$), ainsi que son complément, la probabilité de survie d'un composant à un temps t (la fiabilité $R(t)$) (Hoyland et Rausand, 1994), (Ben-Daya, 2009).
- Les processus markoviens dit « sans mémoire » (Crespo, 2008), (Weber et Jouffe, 2006), permettent de modéliser un processus stochastique en décrivant les états discrets possibles d'un système et les lois de passage d'un état à un autre (marche, panne par exemple (Figure 11)).

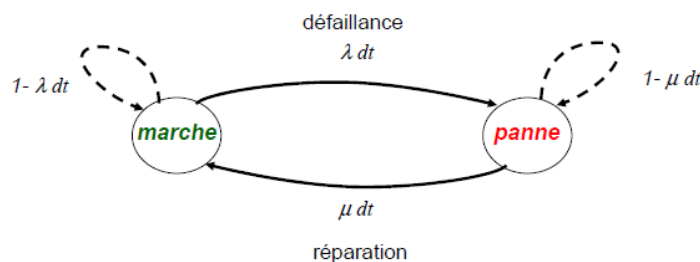


Figure 11. Chaîne de Markov à deux états

L'estimation de la probabilité de défaillance est censée refléter l'état du composant en liant celle-ci au niveau de dégradation du composant, toutefois, les études des défaillances ne permettent pas de connaître l'état réel du composant. Pour estimer de façon plus précise le comportement du composant, des études se sont focalisées sur l'analyse de la trajectoire de la dégradation. Les principaux modèles développés pour étudier l'évolution de la dégradation sont :

- Le processus Gamma qui représente un processus stochastique permettant de modéliser en continu certains modèles de dégradation, caractérisés par des accroissements non négatifs et indépendants (Bordes et al., 2009), (Van Noortwijk, 2009).
- Des modèles physiques qui permettent une représentation continue de la dégradation à travers des modèles mathématiques capables de décrire la trajectoire d'un phénomène de dégradation, (Luo et al., 2003), (Luo et al., 2008).
- Processus semi-markoviens (Muller, 2005) ou les réseaux de Petri (Zille, 2009) et (Clavareau, 2009) en représentant l'état de bon fonctionnement, les états de dégradation et l'état de panne du composant.

La caractérisation de la dégradation et des défaillances permettent de programmer des actions de maintenance qui rajeunissent et qui prolongent la vie utile du composant avant l'apparition des événements non-souhaités. Les choix sur la façon d'entretenir le système (stratégies de maintenance) demandent l'intégration des connaissances soit centrées sur la défaillance ou soit centrées sur l'évolution de la dégradation du composant.

1.3.2. Critères relatifs aux actions de maintenance (Figure 10 – B)

Les stratégies de maintenance impliquent la définition de la gamme des tâches de maintenance à mettre en place pour faire face aux phénomènes de dégradation/défaillance. Les critères associés à ces stratégies permettent de répondre aux questions quand et comment doivent être réalisées les actions de maintenance et combien de temps elles durent.

a) Paramètres déclencheurs des actions de maintenance.

Il existe plusieurs paramètres différents qui déclenchent une action de maintenance. Le premier paramètre est relatif à l'occurrence de la défaillance définissant ainsi deux grandes stratégies de maintenance : la maintenance corrective (après défaillance) et préventive (avant défaillance) (Figure 7).

Maintenance corrective : Maintenance exécutée après détection d'une panne³ et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise (Norme NF EN 13306, 2001). Le principe dans ce type de maintenance consiste à laisser fonctionner le composant jusqu'à l'occurrence d'une défaillance qui déclenche une intervention de maintenance.

Ainsi, le paramètre qui déclenche une intervention est la défaillance du composant. Ce type de maintenance est plus simple à mettre en place parce qu'il n'y a pas besoin de recueillir et d'analyser le retour d'expérience mais son inconvénient est un coût important car la défaillance d'un composant critique peut affecter le fonctionnement de tout le système de production ou provoquer des accidents catastrophiques. Pour ces raisons, cette stratégie de maintenance est

³ 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).

normalement prévue pour des composants de basse criticité, c'est-à-dire que leur dysfonctionnement n'impacte pas de manière significative les performances globales du système.

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, 2001).

Cette stratégie de maintenance anticipe l'occurrence de la défaillance par le déclenchement d'interventions de maintenance avant défaillance pour améliorer la durée de vie utile du composant. Pour définir plus précisément le déclenchement des interventions, il existe plusieurs approches qui se basent soit sur l'analyse de retours d'expérience comme la maintenance systématique, soit sur la dynamique de la dégradation telles que la maintenance 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, 2001).

Les interventions de maintenance sont planifiées en fonction des données historiques du dysfonctionnement du composant, sans connaître l'état réel du composant. Ce type de stratégie nécessite alors d'intégrer la connaissance sur le comportement des défaillances à travers l'analyse statistique des données. De cette façon, les actions sont établies à certaines périodes de temps T (constante) ou en fonction d'unités d'opération du composant, avant que celui-ci n'ait atteint par exemple la « moyenne des temps de fonctionnement (MUT) ».

Par rapport à cette stratégie, le paramètre à optimiser est la périodicité des interventions de maintenance (T) qui minimisent les coûts par unité de temps. Il est possible de différencier deux sous-types de maintenance préventive systématique : les remplacements à intervalles constant ou les remplacements basés sur l'âge.

Les remplacements à intervalles constants consistent en la réalisation d'une intervention à chaque intervalle de temps $k \times T$ avec $k = 1, 2, \dots, n$. Si une défaillance apparaît dans l'intervalle de temps entre deux maintenances préventives, le composant est remplacé sans affecter la planification de la prochaine intervention préventive (Barlow et Proschan, 1965) (Figure 12).

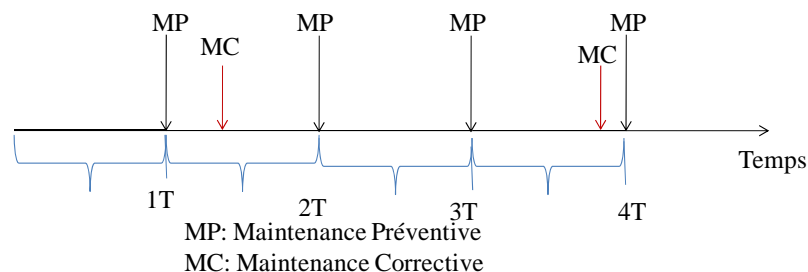


Figure 12. Remplacements à intervalles constants

Certaines variantes comme (Barlow et Hunter, 1960) considèrent que les interventions ne sont pas des remplacements mais des dépannages. (Tango, 1978) suggère plutôt de remplacer les composants défaillants par des composants usés. (Nakagawa, 1984) prend en compte un deuxième

paramètre déclencheur des interventions : le nombre de défaillances « n ». Dans ce sens, un composant est remplacé s'il a cumulé un certain nombre de défaillances « n » ou s'il atteint une période pour des remplacements préventifs T.

Dans le cas de remplacements basés sur l'âge, les interventions préventives sont réalisées à chaque intervalle du temps T_K mais à la différence avec la stratégie précédente, lorsqu'une défaillance apparaît dans l'intervalle de temps entre deux actions préventives, une intervention corrective de remplacement est réalisée. Alors, l'âge du composant revient à zéro (0) et la prochaine intervention préventive est réalisée à un intervalle de temps T à partir de la date du remplacement correctif (Barlow et Hunter, 1960) (Figure 13).

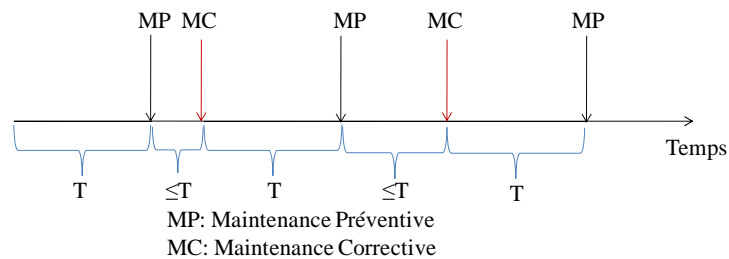


Figure 13. Remplacements basés sur l'âge

D'autres variantes ont émergé comme les interventions correctives avec différents degrés de restauration : parfait (remplacement) ou minimal (dépannage) (Valdez-Flores et Feldman, 1989). (Sheu et al., 1995) tient compte d'un autre paramètre : le nombre des réparations « n ».

De plus, dans la littérature, plusieurs dérivations de ce type de maintenance sont développées telles que :

Maintenance préventive séquentielle : Le principe de cette stratégie est d'effectuer une action préventive à des périodes de temps décroissantes en considérant que le composant se dégrade avec l'âge (à des intervalles de temps préétablis). Dans cette stratégie les intervalles de temps ne sont calculés qu'après chaque intervention basée dans le temps de vie utile et en minimisant les coûts.

Compte tenu du numéro de réparations : Dans ce cas, le composant est remplacé à chaque k-ième réparation (nombre défini d'unités d'usage). Cette stratégie est fondée sur l'idée que les réparations ont un degré minimal de restauration du composant (Misra, 2008) et (Wang, 2002).

Les actions systématiques prévoient le remplacement du composant à une période de temps fixe sans évaluer l'état du composant. Il est possible d'observer plusieurs variantes que ce soit sur les paramètres déclencheurs des actions ou sur l'efficacité des actions. Néanmoins, dans la plupart des travaux, le critère à optimiser est le coût par unité de temps.

L'avantage de ces stratégies de maintenance systématique est la facilité de leur mise en œuvre mais elles sont plus coûteuses que d'autres puisqu'elles permettent de réaliser des interventions de remplacement préventif sur un composant potentiellement encore en très bon état.

Ce type de stratégie convient aux systèmes ayant des profils d'exploitations connus et stables, et avec suffisamment d'informations pour permettre d'estimer les paramètres avec un degré de

confiance suffisant. Toutefois dans le cas de systèmes ne répondant pas à ce point, des stratégies avec surveillance ont été développées.

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, 2001). Sur ce type de maintenance le paramètre déclencheur d'une intervention est le seuil de la variable surveillée.

Ce type de maintenance repose sur la mesure, l'observation, le traitement et l'analyse des variables représentatives de la dégradation du composant ou du système permettant d'anticiper la défaillance et de faciliter la réalisation du diagnostic à travers les variables surveillées (Kothamasu et al., 2006).

Ainsi, toute une infrastructure de surveillance doit être mise en place, avec par exemple des réseaux, capteurs, un ensemble de logiciels pour traiter et analyser les comportements de la dégradation observés de manière directe ou indirecte. Ce type de stratégie optimise l'utilisation des ressources mais son déploiement amène donc des coûts plus élevés que la maintenance systématique.

Dans la plupart des cas, les paramètres à optimiser sont la périodicité d'observations pour les systèmes ayant une surveillance non-continue et le seuil de la variable à surveiller. (Marseguerra et al., 2002) optimisent des seuils à travers l'utilisation d'algorithmes génétiques en estimant les performances d'une fonction objectif au niveau des coûts et disponibilité. D'autres travaux (Deloux et al., 2009) définissent le seuil de sorte que le système soit capable de remplir les performances à un niveau de production, qualité et sécurité mais en optimisant la périodicité d'observations. La détérioration est modélisée à travers un processus stochastique, le système possède une périodicité d'observations considérée comme un intervalle de temps fixe T_i . Celle-ci est optimisée en fonction du taux des coûts par unité du temps. Pour (Castanier et al., 2005) les inspections sont planifiées selon l'état actuel du composant (non-fixes).

D'autres stratégies qui se basent sur le principe de la maintenance conditionnelle, la surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs sont aussi proposées, comme :

Limite de défaillance : Pour cette stratégie il s'agit de surveiller le taux de défaillance (ou d'autres paramètres de performance) et de fixer un seuil sur ce paramètre. A chaque fois que le composant franchit le seuil, une intervention de maintenance préventive est déclenchée et s'il y a une panne, une action corrective est réalisée.

Limite de réparation : Cette stratégie propose d'établir une limite de coût de réparation. Si le composant tombe en panne et si le coût de la réparation est supérieur à la limite, le composant doit être intégralement remplacé.

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, 2001).

Cette stratégie de maintenance repose aussi sur la mesure, l'observation, le traitement, l'analyse des variables représentatives de la dégradation du composant ou du système qui permettent la

mise en place d'une prédiction d'évolution de ces variables. La maintenance prévisionnelle est une approche proactive par rapport à la dégradation à travers l'exploitation d'un processus de pronostic permettant d'estimer la date de la future défaillance dans un intervalle du temps afin d'agir pour garantir les performances du composant tout au long de sa durée de vie (RUL de l'anglais Remaining Useful Life). Normalement le pronostic est basé soit sur un modèle physique, un modèle guidé par les données ou basé sur l'expérience (Byington et al., 2002).

Comme ce type de maintenance est basé sur l'état du système (de même que la maintenance conditionnelle), alors le paramètre à optimiser est le seuil d'une variable de dégradation ou déviation qui déclenche une action de maintenance (Grall et al., 2002). Néanmoins, dans ce type de maintenance, il existe aussi d'autres problèmes liés aux performances du pronostic par exemple, sa précision, son exactitude, entre autres.

Dès que le moment, où l'action aura lieu, a été défini, il est nécessaire de déterminer quel est l'impact de cette action sur l'amélioration de l'état du composant (degré de restauration de la maintenance). Il est alors nécessaire de répondre aux questions du type : est-ce-que l'action sera un remplacement, un dépannage ... ?

b) Degré de restauration de la maintenance

Quelque soit la stratégie choisie, l'un des attributs principaux d'une intervention de maintenance est l'impact de cette action sur l'état du composant (health condition). Selon (Dekker, 1996) une action de maintenance est efficace si elle s'adresse aux mécanismes de dégradation les plus significatifs.

Ainsi, il faut préciser l'efficacité des tâches de maintenance ou le degré de restauration. Par exemple, pour la maintenance préventive systématique il faut différencier les tâches de remplacement des tâches mineures de maintenance comme un graissage. D'après (Ho-Joon Sung, 2008), il existe trois façons de caractériser l'efficacité :

- Parfaite (AGAN): Ce sigle en anglais « As Good As New » signifie « aussi bon que neuf ». Dans ce cas, chaque action de maintenance remet à zéro le taux de défaillance du système. Ce cas s'adapte bien aux remplacements des composants.
- Minimale (ABAO): Ce sigle en anglais « As Bad As Old » signifie « aussi mauvais que vieux ». Une action minimale remet le système en fonctionnement mais le taux de défaillance reste identique. Ce modèle correspond bien aux réparations : par exemple lorsqu'une pièce mineure de l'équipement est remplacée (Pham et Wang, 1996). Cette vision n'est pas bien adaptée à la modélisation des actions préventives puisqu'elle ne modélise pas les bénéfices obtenus sur le rajeunissement du composant.
- Imparfaite : C'est une modélisation plus réaliste pour les actions préventives car lors de celles-ci, l'état du système n'est ni comme neuf ni comme avant la défaillance. Il est dans un état intermédiaire borné par ces deux extrêmes (Lin et al. 2000), (Bartholomew-Biggs et al., 2009) (Wang et Pham, 1999).

Pour représenter les effets des différents types d'actions sur l'état du composant il est nécessaire de s'appuyer sur des processus stochastiques (Figure 14).

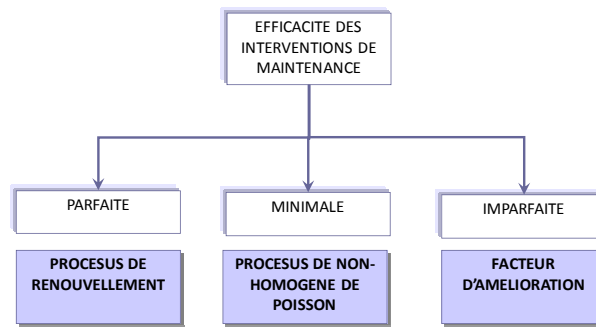


Figure 14. Catégorie de processus stochastiques pour les systèmes réparables (Yanez et al., 2002)

Le processus de renouvellement est une généralisation du processus de Poisson permettant aux temps d'arrivée de défaillance de suivre une distribution arbitraire F (et donc pas limitée à une distribution exponentielle).

Les actions parfaites peuvent être représentées en se basant sur un processus de renouvellement. Ce processus fait l'hypothèse de temps entre défaillances indépendants et identiquement distribués. Dans le cas des remplacements, cette hypothèse s'adapte assez bien puisqu'à chaque fois que le composant tombe en panne il est remplacé et le niveau de dégradation est remis à zéro, alors le temps d'opération précédent t n'a donc plus d'effet sur le temps d'opération future $t+1$. Suite à une action de maintenance, sa fiabilité revient à un et l'âge du composant à zéro (Nakagawa, 2005).

De plus, le processus non-homogène de Poisson, ne fait pas l'hypothèse du taux d'arrivée λ constant, utilisant un λ en fonction du temps : $\lambda(t)$. Dans ce cas, la probabilité d'occurrence de « n » défaillances dans un intervalle de temps $[t_1, t_2]$ a une distribution de Poisson, avec une moyenne :

$$\bar{\lambda} = \int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \tag{1}$$

Ce processus suppose que le temps d'arrivée d'une défaillance « n » est conditionné par le temps d'opération avant la défaillance « $n-1$ » (Figure 15). Dans ce sens, les temps entre défaillances sont dépendants et ce processus est capable de modéliser les interventions minimales puisque suite à une action, la durée de vie du composant reste égale à celle précédent avant l'intervention. Il n'y a donc pas une amélioration sur la durée de fonctionnement du composant (Kumar et al., 2000).

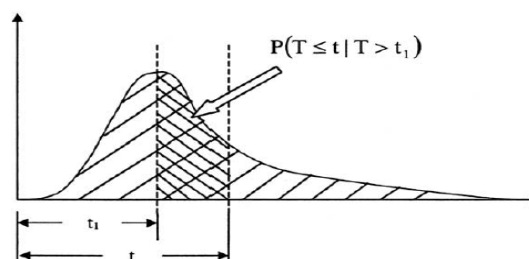


Figure 15. Probabilité conditionnelle d'occurrence d'une défaillance (Yanez et al., 2002)

Pour modéliser l'effet d'actions imparfaites, il est nécessaire d'évaluer une quantité de rajeunissement induit par l'action. La plupart des méthodes utilise un facteur qui améliore l'âge ou le taux de défaillance du composant entre ABAO et AGAN. Couramment, les méthodes pour modéliser l'effet d'une action imparfaite sont : la règle p,q (Nakagawa, 1979) avec un quasi-processus de rénovation (Wang et Pham, 1996), le facteur d'amélioration, l'âge virtuelle (Kijima et al., 1988).

- La méthode p, q (Nakagawa, 2005) modélise une action imparfaite par deux effets, un effet d'amélioration de l'état du composant (efficacité parfaite) quantifié avec une probabilité de « p » et un effet de dépannage quantifié avec une probabilité de « q » ($q=1-p$) sur un quasi-processus de renouvellement (Wang et Pham, 1996).
- Les facteurs d'amélioration « a » ($0 \leq a \leq 1$) après une action imparfaite, où le facteur est multiplié par l'âge virtuel du composant (Kijima et al., 1988), (Clavareau et Labeau, 2009) et (Hu et al., 2009) réduisant son âge virtuel et augmentant la vie rémanente du composant. Dans le cas où « a »=1 l'action est considérée comme une action d'efficacité parfaite et pour « a »=0, l'action est considérée comme une action d'efficacité minimale.

De cette façon il est possible d'estimer l'impact des actions de maintenance sur l'état du composant et de planifier des actions de maintenance systématique à partir de ces informations. Un autre aspect à considérer, au-delà de la fréquence des actions et de leur efficacité, est leur durée.

c) Durée de la maintenance

La durée de la maintenance va dépendre principalement de la capacité du composant à être maintenu et du support du système logistique. Cette notion est normalement estimée à travers l'une des propriétés d'un composant : sa maintenabilité.

Par définition, la maintenabilité est l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits (NF EN 13306, 2001).

La maintenabilité est généralement la caractéristique d'un système ou d'un composant à être réparé ou modifié afin de prévenir les défaillances ou anticiper les dégradations. La maintenabilité est présentée comme une caractéristique physique d'accessibilité mais aussi comme une caractéristique qui détermine les exigences de la maintenance au niveau des coûts, temps, charge de personnel, compétences du personnel, données techniques et équipement de test (Morel et al. 2009).

Pour quantifier la maintenabilité, (Birolini, 1999) considère la probabilité qu'une action préventive ou une réparation soit réalisée dans une période de temps t avec des procédures et des ressources données. Un autre indicateur pour mesurer et quantifier la maintenabilité est donné par (Dhillon, 1999), qui se base sur la somme de temps totale pour entretenir le composant. Ce temps comprend les délais de diagnostic, délais de réparation active, délais logistique et des délais administratifs.

Dans le domaine de l'évaluation des stratégies de maintenance, peu de travaux ont considéré le temps de réparation de maintenance préventive ou les ressources de la maintenance. Un grand nombre fait l'hypothèse que le temps de réparation est négligeable ou que les ressources sont toujours disponibles (Wang et Pham, 1999), (Bartholomew-Biggs, 2008). Cette hypothèse a pour effet de supprimer l'impact de la maintenabilité, des temps de réparation et de l'indisponibilité des ressources sur les performances du système. Or la disponibilité des ressources a un impact sur la maintenabilité et donc sur la disponibilité du système (norme CEI 60300-3-14, 2004). A cet égard, selon la norme (CEI 60300-3-14, 2004), les durées d'opérations de maintenance dépendent :

- a.- De l'aptitude du dispositif à être maintenu ou remis en service (facilité de diagnostic, accessibilité des éléments, etc.).
- b.- Des moyens logistiques de la maintenance qui sont effectivement mis en œuvre (personnel, formation, stocks de pièces de rechange, moyens matériels, documentation, etc.).

De plus, d'autres facteurs impactent le temps d'une intervention de maintenance et ont été étudiés par (Knezevic, 2009) :

- Facteurs humains tels que la motivation, les compétences, l'expérience, les capacités physiques, etc.
- Facteurs de criticité de la défaillance : ce sont les facteurs qui influencent l'environnement de réalisation de l'action comme les conséquences de la défaillance sur l'état physique du système.
- Facteurs environnementaux tels que la température, l'humidité, la luminosité, les vibrations, etc.

(Knezevic, 2009) propose que la durée du temps de maintenance (DMT) soit représentée par une fonction :

$$DMT = f(\text{facteurs du personnel, criticité et environnementaux})$$

Il est possible d'étendre la fonction de (Knezevic, 2009) pour caractériser l'indisponibilité, en incluant les facteurs logistiques énoncés dans la norme (CEI 60300-3-14, 2004). En conséquence, cette durée sera :

$$DD(\text{Temps hors service}) = f(\text{facteurs du personnel, criticité, environnementaux, délais logistiques et administratifs}) \quad (2)$$

L'étude et l'analyse de l'impact de ces facteurs est nécessaire pour quantifier les performances « attendues » dans l'entreprise.

1.3.3. Critères relatifs à l'organisation de la maintenance et à son environnement (Figure 10 – C)

Une fois défini le quand, comment et combien de temps, il est aussi nécessaire de répondre aux questions de qui et avec quoi doit s'effectuer les interventions.

a) L'impact des facteurs logistiques sur les performances du composant

Les activités de logistique permettent normalement de mettre à disposition les ressources correspondantes aux besoins du SM pour supporter le SP. Les facteurs logistiques comme la disponibilité du personnel et la disponibilité des pièces de rechange permettent de réaliser les actions de maintenance dans une durée déterminée. La disponibilité des ressources a un impact sur la maintenabilité et donc sur la disponibilité du système (Pérès et Noyes, 2003) (norme CEI 60300-3-14, 2004). Des travaux, qui évaluent les stratégies de maintenance, très peu considèrent l'impact des systèmes contributeurs du SM. Cette hypothèse supprime l'impact du système logistique sur le SM, générant une incertitude pouvant être importante et décisive dans la prise de décision.

Toutefois, certains travaux traitent ces aspects comme (Marseguerra et Zio, 2002) qui considèrent la disponibilité du personnel de maintenance. Pour intégrer la notion de disponibilité du personnel, les auteurs évaluent que le composant passe vers un état de fonctionnement si le nombre de composants en panne simultanément est inférieur au nombre de mainteneurs disponibles. La complexité de ce problème est étudiée en utilisant la simulation de Monte Carlo.

(Zille, 2009) intègre la disponibilité des ressources dans un réseau de Pétri stochastique en représentant le nombre des ressources disponibles par une quantité de jetons et leur état par deux places : disponible et indisponible. Le marquage de la place « ressource disponible » évolue à chaque fois que le jeton franchit la transition de sollicitation de la ressource.

Sur l'évaluation des stratégies de maintenance, les aspects de disponibilité humaine ne sont traités que sur très peu des travaux ainsi que les aspects de fiabilité humaine et d'efficacité humaine « comment le mainteneur peut impacter la réussite ou non d'une intervention ? » (Léger, 2009).

b) L'impact des facteurs humains et organisationnels sur les performances du composant

Les performances d'un composant ne sont pas uniquement impactées par les aspects techniques tels que la nature de l'action ou la disponibilité de ressources mais aussi par les conditions de son environnement socio-technique (Schönbeck, 2010). L'erreur humaine est définie par (Dhillon, 2006) comme étant la défaillance dans la réalisation d'une tâche spécifique (ou d'une action interdite) qui peut conduire à la perturbation d'un programme d'opérations ou qui engendre un dommage sur un composant. (Reason, 1997) la définit comme « une perturbation des actions planifiées afin d'atteindre les objectifs sans l'intervention d'un événement non-désirable ».

Les performances de l'opérateur sont impactées par les diverses interactions qu'il a avec son environnement, issues de l'organisation et du management de l'entreprise. D'autres travaux existent qui portent sur les facteurs organisationnels impactant la performance humaine dans le domaine de la maîtrise des risques plutôt qu'en maintenance (Mohaghegh, 2007), (Øien, 2001). Ces études proposent différentes théories sur les causes des erreurs humaines dans une organisation : la plupart modélisent les facteurs organisationnels issus des décisions au niveau

stratégique et comment elles impactent le comportement de l'opérateur (sa performance). Dans l'ensemble de ces des travaux nous pouvons identifier deux types d'approche :

1. Première génération : les analyses de la fiabilité humaine visent à identifier les erreurs humaines comme des défaillances dans la réalisation d'une action ou une réalisation inadéquate qui dégrade les performances du système. En fait, la probabilité d'erreur humaine (HEP) est définie comme (Latorella et Prabhu, 2000):

$$HEP = (\text{nombre d'erreurs d'un type donné}) / (\text{nombre d'opportunités d'occurrence de l'erreur}) \quad (3)$$

Ces études se sont focalisées sur la prédiction du taux d'erreurs humaines (Swain et Guttman, 1983). Cependant, le domaine de la fiabilité humaine a reconnu l'importance de l'environnement sur l'humain. Des variables supplémentaires appelées « Performance Shaping Factors (PSFs) » sont incorporées dans le modèle pour augmenter ou diminuer le taux d'erreur. Mais l'inconvénient de ces méthodes est qu'elles se focalisent sur les systèmes existants donc elles ne sont pas applicables lors de phases de conception de système.

2. Deuxième génération : Elle peut être identifiée où les études utilisent des méthodes plus qualitatives pour créer des modèles causaux de comportement humain et permettant d'analyser les types d'erreurs humaines.

Dans le domaine de la maîtrise des risques, (Léger, 2009) a travaillé avec des facteurs pathogènes qui influencent l'efficacité d'une action. Ces facteurs sont considérés comme une source de diminution de la performance humaine. Ils peuvent être, par exemple, la source de l'inefficacité d'une action.

Selon (Mohaghegh, 2007) les facteurs qui impactent les performances d'un individu peuvent être décomposées en trois facteurs globaux : la motivation (M), l'habilité (A) et l'opportunité (O) (Figure 16). La motivation est affectée par le climat psychologique. Les habilités sont vues comme les compétences physiques ainsi que les compétences cognitives de l'individu et l'opportunité est perçue comme des opportunités temporelles (i.e. la pression due au programme de travail) ou opportunités physiques dues à l'environnement de travail.

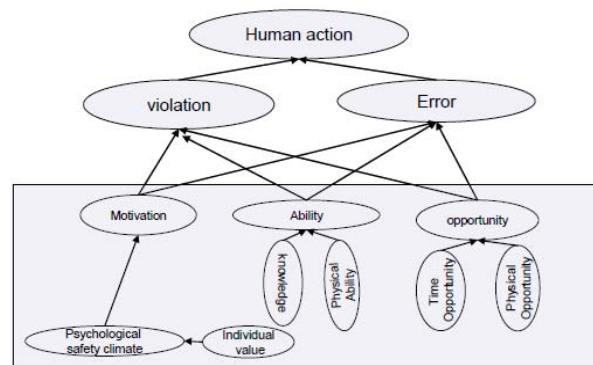


Figure 16. Facteurs qui impactent les performances d'un individu (Mohaghegh, 2007)

Sur un aspect complémentaire, (Øien, 2001) s'intéresse à l'impact de l'organisation sur le risque. Les facteurs identifiés sont théoriques ainsi que pratiques. Nous pouvons distinguer des facteurs

comme: le facteur de l'individu (inattention, manque de motivation), la formation et les compétences, les procédures et les instructions, le planning, le contrôle et l'organisation, la conception et le programme de maintenance préventive et d'inspections. Néanmoins, le facteur de l'individu n'a pas été pris en compte puisqu'il n'est pas un facteur organisationnel. Pour quantifier ces impacts, dans ces travaux, les réseaux bayésiens sont utilisés.

Dans le domaine de la fiabilité et la maintenance, (Kiassat et Safaei, 2009) a étudié les facteurs humains en relation avec la fiabilité du système. Ces facteurs sont des conditions engendrant de possibles erreurs de l'individu. Ces facteurs sont intégrés au sein d'un modèle proportionnel des risques (PHM) par l'utilisation de co-variables (de nature humaine) qui impactent la fiabilité du composant.

Il n'existe pas un consensus sur les facteurs organisationnels qui impactent majoritairement le facteur humain (Schönbeck, 2010) et (Øien, 2001). Il n'y a pas non plus un consensus sur la façon sur laquelle ces facteurs affectent le comportement humain. Toutefois, ces études coïncident sur l'influence des facteurs humains et organisationnels, de façon directe ou indirecte, sur les performances d'un composant (Léger, 2009).

Dans cette logique, le plan de maintenance doit donc intégrer l'impact du contexte sociotechnique, par exemple si l'opérateur n'a pas les compétences demandées alors il risque de mal effectuer l'intervention, laissant le composant dans un état plus dégradé que celui prévu. Un autre facteur, qui peut modifier les performances « prévues » dans le plan de maintenance dans le cadre d'actions conditionnelles et prévisionnelles, est la fiabilité du système d'observation utilisé pour détecter au bon moment le dysfonctionnement du système.

c) Fiabilité du système de surveillance

Les maintenances conditionnelle et prévisionnelle sont basées sur la surveillance des variables représentatives de la dégradation tels que les symptômes ou les déviations de flux. Ces variables sont mesurées directement durant la période de fonctionnement et si les variables franchissent un seuil (temps réel ou prédiction pour la maintenance conditionnelle et prévisionnelle respectivement), une action de maintenance est déclenchée.

L'une des caractéristiques importantes dans ce type de maintenance est la fiabilité de son système d'observation. En fait, la surveillance et la génération d'alarmes en relation avec les observations ne sont pas parfaites en pratique (Kallen et Noortwijk, 2005), (Weber et al., 2008), (Basseville et Nikiforov, 1997).

Des travaux ont étudiés et modélisés ces erreurs : (Zhao et al., 2007) proposent une optimisation d'un système de surveillance en considérant une probabilité $1 - \beta$ pour la détection d'un défaut suite à une inspection et β pour la non-détection. (Barros et al., 2006) prennent en compte les problèmes de non-détection pour l'optimisation d'une stratégie de maintenance pour un système à deux composants.

En général, il existe toujours une probabilité de fausse alarme, et donc une intervention peut être déclenchée lorsque le composant est en bon état (Chelbi et Ait-Kadi, 2009) (Fouladirad et al., 2008).

Il est intéressant de prendre en compte cet aspect puisque la fiabilité du système d'observation impacte les choix d'action, dans le sens où lorsque le système ne détecte pas le niveau adéquat de dégradation, le composant risque de tomber en panne entraînant un surcoût du à une opération de maintenance corrective plus élevée que le coût d'une action de maintenance préventive. D'autre part, si le système génère une fausse alarme, une action préventive est déclenchée alors que le composant est en bon état créant également des surcoûts.

Un dernier facteur qui affecte la durée de vie utile du composant est le contexte opérationnel qui l'entoure.

d) L'impact des conditions environnementales sur les performances du composant

L'environnement auquel les composants sont soumis est une variable exogène à la maintenance. Cependant elle impacte la performance du système, plus spécifiquement la vitesse des mécanismes de dégradation : par exemple, si un pipeline est soumis à de hautes températures, la corrosion s'accélère. De plus, il y a certains facteurs environnementaux qui sont issus des décisions d'exploitation du système (e.g. son profil d'utilisation, ses missions) rendant intéressant leur intégration dans les études d'évaluations des stratégies de maintenance.

Plusieurs travaux utilisent le « Proportional Hazard Model » (PHM) (Jardine et al., 2006). Cette approche considère le taux de défaillance d'un composant comme le résultat du taux de défaillance de base (fonction uniquement du temps d'opération) affecté par une fonction exponentielle qui intègre les effets des variables environnementales surveillées.

Le modèle du taux de défaillance est : $h(t ; z) = h_0(t) \exp(z\beta)$ (4)

Où z est le vecteur ligne des co-variables surveillées et β est le vecteur colonne des paramètres de régression qui définit l'influence des variables surveillées sur le processus de défaillance.

Pour (Zille, 2009), les facteurs environnementaux intègrent les conditions d'utilisation, les conditions d'environnement, la dé-fiabilisation liée à une tâche de maintenance et la dégradation ou défaillance d'un autre matériel. Tous ces facteurs sont classés en trois catégories de sévérité : conditions très clémentes, conditions clémentes et conditions peu clémentes. Pour estimer l'impact global des différents facteurs sur le mécanisme de dégradation, les valeurs des différents facteurs sont combinées et regroupées en une seule variable.

(Deloux E. et al., 2009) étudient la définition d'une stratégie de maintenance en relation avec les conditions de l'environnement. Dans le cas d'un système qui subit un processus de dégradation modélisé comme un processus stochastique continu et croissant (e.g. dû à l'usure du système) et affecté par des facteurs environnementaux, les auteurs proposent de surveiller la détérioration X_k par une inspection périodique (x-inspection) pour détecter si le niveau de détérioration est supérieur à un seuil L (L est défini par rapport à un niveau minimal de performance). Ils proposent également une surveillance des variables environnementales à l'aide de la méthode de maîtrise statistique des procédés (MSP). Pour prendre en compte les effets des variables environnementales sur le modèle de dégradation, un facteur d'accélération de la fonction de dégradation est appliqué à chaque fois que les variables environnementales dépassent les limites établies par la MSP. La stratégie proposée établit la réalisation d'inspections pour détecter le

niveau de détérioration (x-inspection), d'inspections pour déterminer l'état du système (z-inspection), la possibilité de remplacements préventifs ou correctifs et d'actions routinières de maintenance. Finalement, l'étude vise à minimiser le coût du système en cherchant des paramètres tels que la période d'inspection, le seuil pour réaliser des actions de maintenance préventives (seuil entre la maintenance préventive et seuil de défaillance), la limite supérieure pour la MSP et la périodicité pour des actions de maintenance routinières.

Il existe différentes approches pour traiter l'influence des facteurs environnementaux : en décrivant l'environnement (par des variables mesurées par exemple) ou en décrivant directement l'impact de celles-ci (variables globales). La première approche surveille chaque variable influente sur la dégradation (Jardine et al., 2006) et (Deloux et al., 2009) avec l'inconvénient de nécessiter un grand besoin de données pour l'implantation, de technologies capables de les obtenir, de les traiter, etc... La deuxième approche permet d'estimer l'influence des facteurs 'globaux' sur les performances du système (Zille, 2009) avec l'inconvénient de provoquer une perte de précision due à l'agrégation de l'influence de l'ensemble des variables dans des « macro-variables ».

En conclusion, pour évaluer les stratégies de maintenance il est nécessaire de considérer des facteurs propres au SM et les interactions avec d'autres systèmes tels que le système logistique ainsi que des facteurs exogènes à la maintenance comme les conditions environnementales. Ces choix déterminent les capacités de réaction du SM.

1.3.4. Critères relatifs aux performances globales (Figure 10 – D)

Les décisions en maintenance pendant les phases de conception ou re-conception du SM sont prises en fonction de performances estimées suite à la simulation des stratégies de maintenance envisagées (comparaison avec celles attendues de niveau SP-SM). Ces décisions sont des problèmes de décisions multicritères principalement de niveau stratégique.

a) Critère à optimiser

Il existe plusieurs travaux qui visent à évaluer l'impact du SM sur les performances du SP. Les approches classiques pour la quantification de l'impact de la maintenance ont été basées principalement sur des aspects financiers mais aussi sur des aspects techniques comme la disponibilité, maintenabilité, etc. (Marseguerra et al., 2002), (Wang H, 2002) et (Dal, 2000). Ainsi l'impact du SM sur les performances globales a été formalisé avec le « tableau de bord prospectif » (TBP) (Kaplan et Norton, 1992) lequel comprend quatre perspectives : financier, clients, processus internes et apprentissage organisationnel. Cet outil permet de relier les performances à différents niveaux organisationnels ainsi que d'intégrer différents types de performances de maintenance à travers ses différentes perspectives. Néanmoins, cet outil n'intègre pas l'impact du SM sur toutes les parties prenantes. Le SM impacte aussi la sécurité et les performances des ressources humaines (Parida, 2006).

(Parida, 2006) définit un cadre avec des indicateurs basés sur la performance interne (procesus de maintenance) et l'efficacité externe (parties prenantes), composé de sept perspectives : les quatre

similaires au TBP avec une vision élargie au niveau des tâches de maintenance, satisfaction du personnel et sécurité et environnement.

Dans ce sens, la maintenance impacte aussi des aspects de développement durable (Sandborn et Myers, 2008). Cela implique que les performances du SM sont critiques pour la conformité des performances liées au développement durable (Liyanaage, 2004).

De ce fait, certains travaux dans le domaine d'évaluation des stratégies de maintenance ont commencé à considérer ces performances « indirectes ». (Hu et al., 2009), (Arunraj et Maiti, 2007) proposent des modèles de « maintenance basée sur le risque » (Risk-based maintenance) pour optimiser la fréquence d'action préventive dans un plan de maintenance en fonction de l'estimation des risques. De façon similaire, (Vatn et Aven, 2010) optimisent les intervalles d'intervention de maintenance avec la formulation d'une fonction objectif qui intègre des aspects relatifs à la sécurité.

Ces performances mesurées sur la base des indicateurs permettent de fournir des informations quantitatives pour les responsables de maintenance. Toutefois, il est nécessaire de quantifier ces performances à différents niveaux d'abstraction.

b) Niveaux d'abstraction sur le SM

La norme (IEC62264, 2007) établit trois niveaux organisationnels pour les décisions relatives au pilotage du système de production d'une entreprise industrielle. Par transposition, trois niveaux organisationnels classiques peuvent être associés aux décisions relatives au pilotage du SM : les niveaux stratégique, tactique et opérationnel.

- Au niveau stratégique, les managers de maintenance spécifient les objectifs prioritaires à long terme en fonction des priorités exprimées au niveau du « business plan ». Pour atteindre ces objectifs, un plan de maintenance est développé.
- Au niveau tactique, il est nécessaire de réaliser l'assignation des ressources ainsi que la planification et programmation de ces ressources à moyen terme afin d'atteindre les objectifs stipulés au niveau stratégique.
- Enfin, au niveau opérationnel, la planification et la programmation de la maintenance sont mises en œuvre. Comme résultat les interventions sont effectuées et le retour d'expérience est collecté (Kumar, 2006).

Les stratégies de maintenance sont définies au niveau organisationnel stratégique par les managers de maintenance afin de satisfaire les objectifs de l'entreprise (Jardine et Tsang, 2005). Ces stratégies sont ensuite décomposées en cibles au niveau opérationnel. Lorsque les actions sont effectuées, il est possible de collecter le retour d'expérience (observé au niveau opérationnel) pour vérifier que les objectifs de l'entreprise sont atteints (Figure 17). Dans ce sens, la plupart des travaux d'évaluation de stratégies de maintenance estiment les performances au niveau d'un composant rendant ces études déconnectées de la réalité (Wang, 2002), (Nakagawa et Mizutani, 2009). Pour faire face à cette problématique, les performances au niveau opérationnel doivent être

agrégées avec l'objectif d'identifier les écarts entre les objectifs et les performances obtenues au niveau stratégique. En conséquence, il est nécessaire d'établir différents niveaux d'abstraction qui permettent d'estimer l'impact du SM à travers des KPI, de façon à ce que les décideurs puissent avoir une vision globale de la situation.

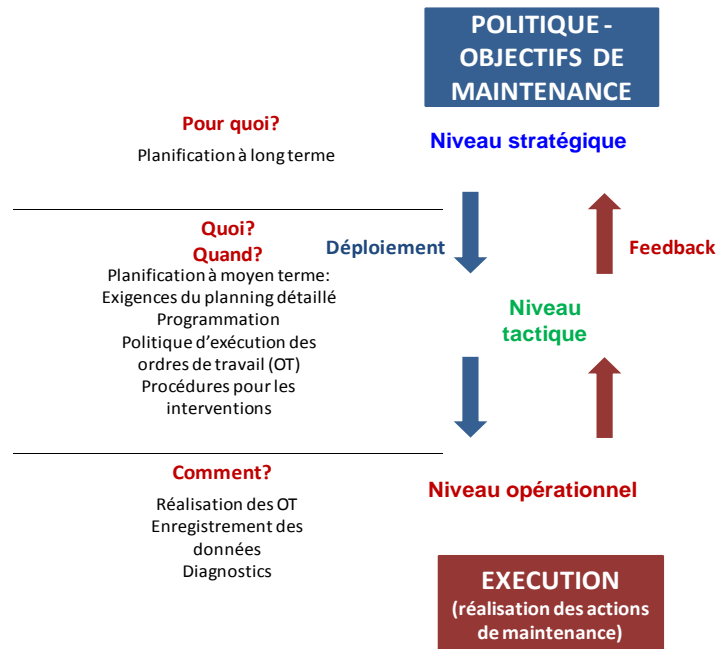


Figure 17. Niveaux classiques organisationnels

Par exemple, pour observer si le SP remplit les exigences de performances au niveau de disponibilité, les estimations au niveau composant ne suffisent pas pour prendre une décision qui concerne le niveau système. En ce sens, il est nécessaire de calculer des indicateurs de performances au niveau système qui permettent de vérifier si les objectifs du SP sont atteints.

Comme ont été définis les critères de performances et les facteurs à considérer pour les stratégies de maintenance, il faut décider d'une représentation qui décrit le comportement du système étudié, dans notre cas du SM et ses interactions avec le SP.

1.3.5. Critères relatifs à la granularité du système (Figure 10 – E)

Les systèmes industriels sont constitués de plusieurs composants avec diverses relations entre eux. Néanmoins, la plupart des travaux développés optimisent la maintenance pour des modèles de systèmes mono-composant. Ceux-ci sont nécessaires pour créer les bases permettant d'étudier les systèmes multi-composants (Crespo, 2008), (Nakagawa et Mizutani, 2009). Toutefois cette hypothèse est assez forte par rapport aux systèmes existants dans la réalité rendant les modèles mono-composant difficiles à exploiter dans le monde industriel (Wang, 2002). Les relations entre divers composants ajoutent une complexité à l'étude de systèmes multi-composants. Selon (Lai, 2007) et (Cho et Parlar, 1991), ils existent trois types de dépendances possibles :

- Dépendance structurelle : elle considère la dépendance topographique des composants, c'est-à-dire l'impact que peut avoir un composant sur un autre dû à la proximité physique entre eux (Monnin, 2007).

- Dépendance stochastique : elle suppose que l'état d'un composant peut affecter l'état d'un autre composant (i.e. taux de défaillance) (Min-Tsai Lai, 2007).

(Nowakowski et Werbinka, 2009) proposent deux modèles « classiques » pour représenter cette dépendance :

- Probabilité « p » : ce type de modèle considère que, quand l'un des composants tombe en panne, il modifie la probabilité conditionnelle de défaillance d'un composant encore en bon fonctionnement avec une probabilité « p », et une probabilité « $1-p$ » s'il n'y a pas d'interaction. Ce modèle peut être considéré comme un modèle de « choc », à chaque fois qu'un composant tombe en panne il augmente le risque de faire subir un « choc » à un autre composant (Zequeira et Bérenguer, 2005).
- Modification du taux de défaillance : dans ce cas, quand un composant tombe en panne, il produit une augmentation du taux de défaillance du composant avec lequel il interagit, en aggravant son état à cause d'une augmentation de la charge du composant par exemple encore valide (Lai, 2009).
- Dépendance économique : elle implique la rationalisation des coûts par le regroupement d'opérations de maintenance dans le cadre de maintenance opportuniste (Thomas, 2009) ou de maintenance en groupe (Dekker et Wildeman, 1997).

La maintenance opportuniste fixe des règles pour identifier des opportunités afin de réduire les coûts de maintenance. Les règles usuelles sont :

- Règle « n_i, N » : un composant est remplacé s'il tombe en panne ou, s'il arrive à un âge N et que d'autres composants sont remplacés, ou s'ils sont arrivés à l'âge n_i (dans ce dernier cas, le composant de départ et les autres composants sont remplacés).
- Règle du limite « L » : l'intervention de maintenance est déclenchée soit parce que le composant est tombé en panne, soit parce que son taux de défaillance est arrivé à une limite « L ». A ce moment, d'autres composants sont remplacés si leur taux de défaillance atteint une limite entre $(L-u, L)$.

Dans le cadre de la maintenance conditionnelle et de la dépendance économique, (Castanier et al., 2005) regroupent des tâches par l'établissement d'un seuil pour définir une zone de « remplacement opportuniste ».

La maintenance en groupe vise à réaliser des économies de grande échelle en faisant des interventions par groupe de composant généralement en fonction de deux paramètres : du nombre de défaillances « m » que le système à subir, d'une période du temps fixe « T » ou des deux (Dekker et Wildeman, 1997) et (Nowakowski et Werbinka, 2009).

Pour représenter les systèmes multi-composants ainsi que les différents critères décrits précédemment résumés à travers la formalisation des différentes dépendances, il existe différents techniques de modélisation.

1.3.6. Techniques de modélisation (Figure 10 – F)

Le SM dans la vision « ingénierie système » doit être considéré de façon holistique. Dans ce sens, les facteurs qui décrivent le système d'un point de vue technique (e.g. analyses fonctionnelle, dysfonctionnelle, etc.), les facteurs qui relient le SM et le SP (e.g. actions de maintenance) et les facteurs qui décrivent une structure organisationnelle doivent être pris en compte dans une vue globale sur la base de méthodes permettant de quantifier les différents types de relations.

Dans la littérature la plupart des travaux portant sur l'évaluation et l'optimisation de la maintenance sont basés sur des modèles mathématiques analytiques modélisant la défaillance principalement à travers des distributions de probabilité (Dekker, 1996). Néanmoins, ces modèles font des hypothèses simplificatrices peu réalistes comme la considération des systèmes mono-composant ou le temps d'intervention de maintenance négligeable. Ces raisons rendent les solutions analytiques difficilement applicables au niveau industriel (Güler et Kaya, 2002).

Pour faire face à cette problématique, d'autres techniques ont été utilisées, comme la modélisation de processus Markovien ou les Réseaux de Pétri stochastiques couplés à la simulation Monte Carlo.

- Les chaînes de Markov :

La méthode de modélisation par processus markovien est bien adaptée pour les études de fiabilité et disponibilité d'un système. Elle permet d'analyser la probabilité exacte de défaillance même quand il existe des dépendances entre les composants. Ainsi elle autorise l'intégration de divers types de connaissances et la représentation des variables multi-états.

(Güler et Kaya, 2002), (Crespo et Sanchez, 2002) modélisent plusieurs états de dégradation, les états de défaillance et les états d'intervention préventive ou corrective sur des modèles de décision semi-markovien. Toutefois, cette méthode a pour inconvénient la croissance exponentielle du nombre d'états, rendant le modèle difficilement lisible et applicable aux cas réels industriels pour lesquels une analyse du comportement des systèmes multi-composants est nécessaire (De Souza et Ochoa, 1992) (Nowakowski et Werbinka, 2009).

- Les réseaux de Pétri stochastique:

Les réseaux de Pétri stochastiques (RdPS) (Dutuit *et al.*, 1997), (Nourelfath et Dutuit, 2004) sont traditionnellement un modèle de support dans des domaines de fiabilité, disponibilité, etc. (Pérès *et al.*, 2007). Les RdP sont utilisés dans le domaine de fiabilité dynamique (Volovoi, 2004) et d'optimisation de stratégies de maintenance (Zouakia *et al.*, 1999).

(Zille, 2009) et (Clavareau, 2008) ont utilisé les RdPS pour l'évaluation des stratégies de maintenance des systèmes multi-composants en intégrant les aspects dysfonctionnels amenant de la représentation des composants multi-états et de la dépendance entre les composants, et l'aspect lié à la maintenance comme le degré de restauration des actions sur le composant.

Cet outil est un formalisme de modélisation puissant, néanmoins les analyses en fiabilité sont basées sur des procédures de simulation. Le comportement dynamique des RdPS est obtenu par l'utilisation de simulation Monte Carlo ou par d'autres méthodes de simulation puisque les méthodes numériques et analytiques ne permettent pas de modéliser des processus non-markovien et les processus d'interdépendance issus des RdP. Les méthodes de simulation ont deux inconvénients : considération inefficace des événements de basse fréquence et le temps de simulation. La considération d'événements de basse fréquence est importante puisque certaines défaillances sont des événements rares avec des conséquences importantes. De plus, les RdPS ne permettent pas de faire de diagnostic ce qui peut être utile dans le cadre d'évaluations de stratégies de maintenance afin de détecter les causes qui produisent des déviations au niveau des performances du SM et du SP.

- Les réseaux bayésiens (RB) :

Depuis l'année 1999 les communautés scientifique et industrielle ont montré de l'intérêt pour l'utilisation de RB dans les domaines de sûreté de fonctionnement et d'optimisation des stratégies de maintenance, générant une croissance importante du nombre de publications scientifiques (Medina-Oliva et al., 2009a), (Boudali et Dugan 2005b), (Langseth et Portinale, 2007) et (Langseth, 2008). Cet intérêt est dû aux avantages que présentent les RB permettant de pronostiquer les performances d'un système multi-composant en incluant des aspects fonctionnels et dysfonctionnels du système (Weber *et al.*, 2001), l'impact des actions de maintenance sur le comportement du système (Muller *et al.*, 2008) (Kang et Golay, 1999), d'observer des relations de causalités entre la dégradation/ cause/ conséquence (Iung *et al.*, 2005), (Borgia *et al.* 2009), et d'incorporer des facteurs organisationnels tels que l'expertise du personnel pour évaluer son impact sur le SM (De Melo et Sanchez, 2008). De plus, il est possible d'intégrer la connaissance d'experts à travers certaines procédures développées (Celeux *et al.*, 2006) dans le cas où il n'existe pas suffisamment de données historiques pour estimer les paramètres du modèle.

Dans la suite nous proposons de faire une synthèse des travaux en évaluation de stratégies de maintenance qui intègrent différents critères tels que ceux recensés dans ce chapitre en utilisant les techniques de modélisation décrit précédemment. Ce bilan nous permettra de positionner certains manques dans les modèles actuels pour satisfaire les besoins industriels et scientifiques sur lesquels nos travaux sont initiés.

1.3.7. Bilan de l'intégration de différents critères

La formalisation des modèles capables de représenter les variables décisionnelles des stratégies de maintenance est une tâche compliquée à cause de l'augmentation de la complexité des systèmes et de la nécessité d'intégrer différents critères et variables du SM et du SP dans un ou plusieurs modèles qui tiennent en compte des dépendances entre ces variables.

Ainsi certains travaux ont essayé de donner une réponse à cette nécessité, par exemple (Borgonovo et al., 2000) traitent un système multi-composants en utilisant la simulation Monte-Carlo mais en tenant en compte de la maintenance systématique et en négligeant l'impact de la logistique.

De façon similaire, (Laggoune et al., 2009) traitent aussi des systèmes multi-composants avec des dépendances économiques pour optimiser les coûts de la maintenance systématique. Mais le degré de restauration est considéré comme parfait, et l'impact de l'environnement et des temps de réparation n'affectent pas les performances des composants.

(Clavareau, 2008) considère ces limites par la prise en compte de facteurs logistiques ainsi que de divers degrés de restauration des actions de maintenance. Néanmoins, ce travail se focalise sur des études de maintenances systématiques.

Sur un volet complémentaire, (Castanier et al., 2005) cherchent à intégrer la maintenance conditionnelle. Ils proposent un modèle analytique pour un système de deux composants dans le cadre de la maintenance conditionnelle. Toutefois, cette solution est peu transposable dans l'industrie lorsqu'il est nécessaire de modéliser des systèmes avec des centaines de composants.

(Marseguerra et Zio, 2002) développent une contribution qui intègre des systèmes multi-composants dans le cadre de la maintenance conditionnelle avec des ressources limitées et l'influence de l'environnement en utilisant la simulation Monte Carlo ainsi que les algorithmes génétiques. Cette proposition manque de généralité pour traiter plusieurs types de stratégies dans un seul modèle.

(Zille, 2009) propose un modèle à base de RdPS qui intègre la majorité des critères, applicable à des systèmes multi-composants qui sont affectés par les conditions environnementales ainsi que par le support du système logistique. Sa proposition considère les différents types de stratégies avec différents degrés de restauration.

Le modèle proposé par (Zille, 2009) ainsi que les autres contributions manquent globalement de généralité puisqu'ils sont traduits directement dans un formalisme (e.g. RdPS) limitant l'intégration de différents types de connaissances. De plus, ces propositions ne sont pas transposables vers d'autres formalismes puisqu'ils ne sont pas basés sur des motifs sémantiques mais plutôt traduits directement vers un modèle exécutable. De cette façon les modèles sont réellement développables que par le concepteur puisque seul celui-ci possède intellectuellement les règles nécessaires à sa construction (et validation).

Enfin l'ensemble de ces travaux se focalisent sur l'optimisation de deux critères de performances classiques, les coûts et la disponibilité, négligeant l'impact du SM sur d'autres performances.

1.4. Bilan sur les méthodologies d'évaluation de stratégies de maintenance existantes

La pertinence de l'évaluation des stratégies de maintenance repose sur l'exhaustivité de la prise en compte dans le modèle support à l'évaluation de l'ensemble des critères recensés dans ce chapitre. Dans les travaux de (Norme FD X 60-000, 2002), (Crespo, 2008) et (Dekker, 1996) les aspects considérés sont principalement les paramètres déclencheurs des actions de maintenance, les critères des performances à optimiser, le degré de restauration du composant suite à une action de maintenance et l'architecture du système mono-composant ou multi-composants. Cependant, la

plupart des modèles existants ne supportent pas l'ensemble de ces éléments qui caractérisent un plan de maintenance, comme les interactions du SM avec ses systèmes contributeurs, amenant à des hypothèses simplificatrices comme la suppression de l'impact du système de ressources humains sur les performances du SM. Ces manques peuvent conduire à une non prise en compte de plusieurs facteurs clés dans l'évaluation telle que :

- non intégration de l'impact de la maintenance sur les autres performances comme la qualité du produit, le risque, etc. (Parida, 2006).

Le SM est un système qui impacte diverses performances (Parida, 2006), (Vatn, 2010). En conséquence les choix réalisés au niveau du SM impactent aussi les performances de plusieurs systèmes contributeurs. Par exemple, la défaillance d'un composant critique peut conduire à des problèmes dans le système de sécurité. Néanmoins, la plupart des travaux (Valdez-Flores et Feldman, 1989) et (Wang, 2002) n'utilisent comme critères d'évaluation que la disponibilité, les coûts ou la fiabilité, négligeant l'impact de la maintenance sur des domaines critiques comme la sécurité ou la qualité.

- non intégration, au-delà des aspects techniques (e.g. les mécanismes de dégradation, fréquences des interventions) des aspects humains et organisationnels qui impactent également les performances du système (Léger et al., 2009).

L'évaluation d'un plan de maintenance doit intégrer l'ensemble des informations pertinentes pour estimer au mieux les performances du système. Cela conduit à l'intégration de l'impact d'autres systèmes contributeurs sur le SM, comme la logistique et les ressources humaines. Toutefois, généralement l'impact du système logistique sur les performances du SM est négligé ainsi que l'impact des performances des opérateurs sur l'efficacité des tâches de maintenance. Cette simplification produit une estimation biaisée des performances (Trucco et al. 2008) et (Kim et al. 2006).

- non considération des différents types de dépendances (stochastiques, structurelles, économiques...).

Une grande partie des modèles qui ont été développés, sont bien adaptés à des systèmes mono-composant. Néanmoins, l'étude des systèmes industriels demande des analyses pour des systèmes multi-composants. La représentation des systèmes multi-composants génère des interactions au niveau des processus de dégradation et défaillance entre composants ou au niveau des économies grâce à la réalisation de tâches en groupe qui permet de profiter des économies de grandes échelles. Peu des travaux (Lai, 2007) et (Cho et Parlar, 1991) prennent en compte cette problématique.

- manque de généricité dans les modèles d'évaluation des stratégies de maintenance limitant la réutilisation des modèles et la capitalisation de connaissances.

Les méthodes actuelles pour évaluer les stratégies de maintenance sont trop ciblées et ne permettent pas l'intégration/interopération des différents modèles de connaissance (technique- humain- organisationnel). Ce manque de généricité pour représenter l'ensemble des critères liés aux évaluations des stratégies de maintenance, limite le

développement et l'exploitation des modèles dans l'industrie. En effet, le développement des modèles implique des coûts d'études importants. En revanche, une approche générique doit permettre l'identification des points communs à tous les modèles, facilitant le processus d'instanciation sur une application spécifique (Projet SKOOB, 2011).

Dans ce contexte, notre objectif scientifique est de proposer une méthodologie pour répondre en partie aux insuffisances soulevées précédemment. En ce sens, cette méthodologie devrait intégrer les différents choix sur les interventions de maintenance à mettre en place ((Wang, 2002) (i.e. nature de l'intervention, fréquence, les conditions de réalisation des interventions...(Norme FD X 60-000, 2002)) afin d'estimer l'impact de ces choix sur les performances du SP et du SM. Cela permettra de prédire l'écart entre les performances opérationnelles et les objectifs visés par l'entreprise tels que la disponibilité, les coûts, la sécurité, etc. (Crespo, 2008), (Monnin, 2008). Ces résultats peuvent ensuite être utilisés pour cibler des améliorations.

Pour aider à la prise de décision des responsables de maintenance, nous proposons de définir une méthode de formalisation et de construction d'un modèle en veillant à donner une première réponse aux verrous scientifiques suivants :

- création des motifs génériques permettant de capitaliser et de réutiliser les modèles (modélisation modulaire) (Clavareau et Labeau, 2009),
- modélisation d'un plan de maintenance intégrant la connaissance sur le SP et le SM et ses systèmes contributeurs, formalisant les points de vue technique, organisationnel, humain et son environnement (Trucco et al. 2008) et (Kim et al. 2006),
- modélisation des systèmes multi-composants (Lai, 2007),
- évaluation des performances multicritères (Parida, 2006) et (Vatn, 2010).

1.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé le contexte de la maintenance et son rôle fondamental pour améliorer les performances globales d'un système industriel. Plus spécifiquement, le SM est un des éléments clés du MCO du SP dans les phases d'exploitation et de fin de vie. Ainsi, dès la phase de conception, il existe des interactions entre les exigences du SP et du SM, par exemple, certaines exigences du SP (e.g. disponibilité) induisent des exigences sur le SM (e.g. MTTR-MTBF pour garantir le niveau de disponibilité) et des exigences sur le SM contraignent également les exigences du SP (e.g. la fiabilité d'un équipement va impacter la qualité des produits). Le SM a aussi, de façon récursive, un ensemble d'exigences et de contraintes à respecter en lien avec ses systèmes contributeurs tels que la logistique, les ressources humaines, etc. pour atteindre les objectifs fixés.

Pour fournir le support du SM au SP dans la phase d'exploitation, des stratégies de maintenance sont définies dans la phase de conception du SP et du SM ou dans la phase d'exploitation du SP

et/ou dans la phase de re-conception du SM. Cela conduit à la définition des ressources et méthodes à mettre en place pour répondre aux besoins du SM. Ces choix de prise de décision sont à ce jour basés sur des modèles permettant d'évaluer les stratégies de maintenance à partir d'une quantification du plan de maintenance et de l'organisation associée.

Nous avons donc identifié les critères à intégrer dans les modèles requis pour évaluer les stratégies de maintenance d'un point de vue exhaustif par rapport à la vision SP-SM et les performances propres au SM. Toutefois, les approches actuelles de modélisation ont certaines limitations rendant les modèles difficilement applicables dans l'industrie à cause d'hypothèses trop simplificatrices comme l'étude de systèmes mono-composant. D'autres modèles, non contraints par ces hypothèses, sont construits de façon assez « empirique » ce qui conduit à un manque de généralité avec une incidence sur la qualité du modèle.

Nous avons donc identifié les insuffisances des approches actuelles pour donner une première orientation à la méthodologie que nous souhaitons développer et qui prend en compte : les interactions entre composants, les interactions entre le SP, le SM et ses systèmes contributeurs. Cette méthodologie permet d'estimer les différents critères de performances, telles que la disponibilité, la qualité et les coûts. Cette prise en compte est réalisée de manière structurée et « générique » conduisant à développer un modèle sur des principes de modularité, de réutilisabilité, etc.

Pour cela, il est nécessaire de considérer des connaissances de diverses natures issues du plan de maintenance (qualitative et quantitative) nécessitant donc la maîtrise et la formalisation de chaque domaine de connaissance ainsi que l'identification des relations et dépendances entre ces connaissances. Ceci fait l'objet du chapitre suivant qui détaille la méthodologie de structuration de connaissances afin de formaliser les interactions du SP avec le SM, à travers différents modèles métiers permettant de prendre en compte les différentes variables décisionnelles d'une stratégie de maintenance ainsi que les relations entre elles afin d'établir des règles sémantiques exprimant des dépendances (Figure 18, Point A). Ensuite le chapitre 3 décrit les principes de transformation de ces règles sémantiques (Figure 18, Point B) pour créer des motifs génériques, modulables, interconnectables, stockables en bibliothèque (du type COTS) permettant de quantifier l'impact des stratégies de maintenance. Le chapitre 4 complète la définition des motifs en développant une proposition pour la quantification en termes probabilistes de leurs TPC (Figure 18, Point C). Finalement le chapitre 5 montre une application de la méthodologie à un cas industriel réel (Figure 18, Point D). Ce dernier chapitre vise à démontrer la faisabilité et la valeur de la méthodologie proposée.

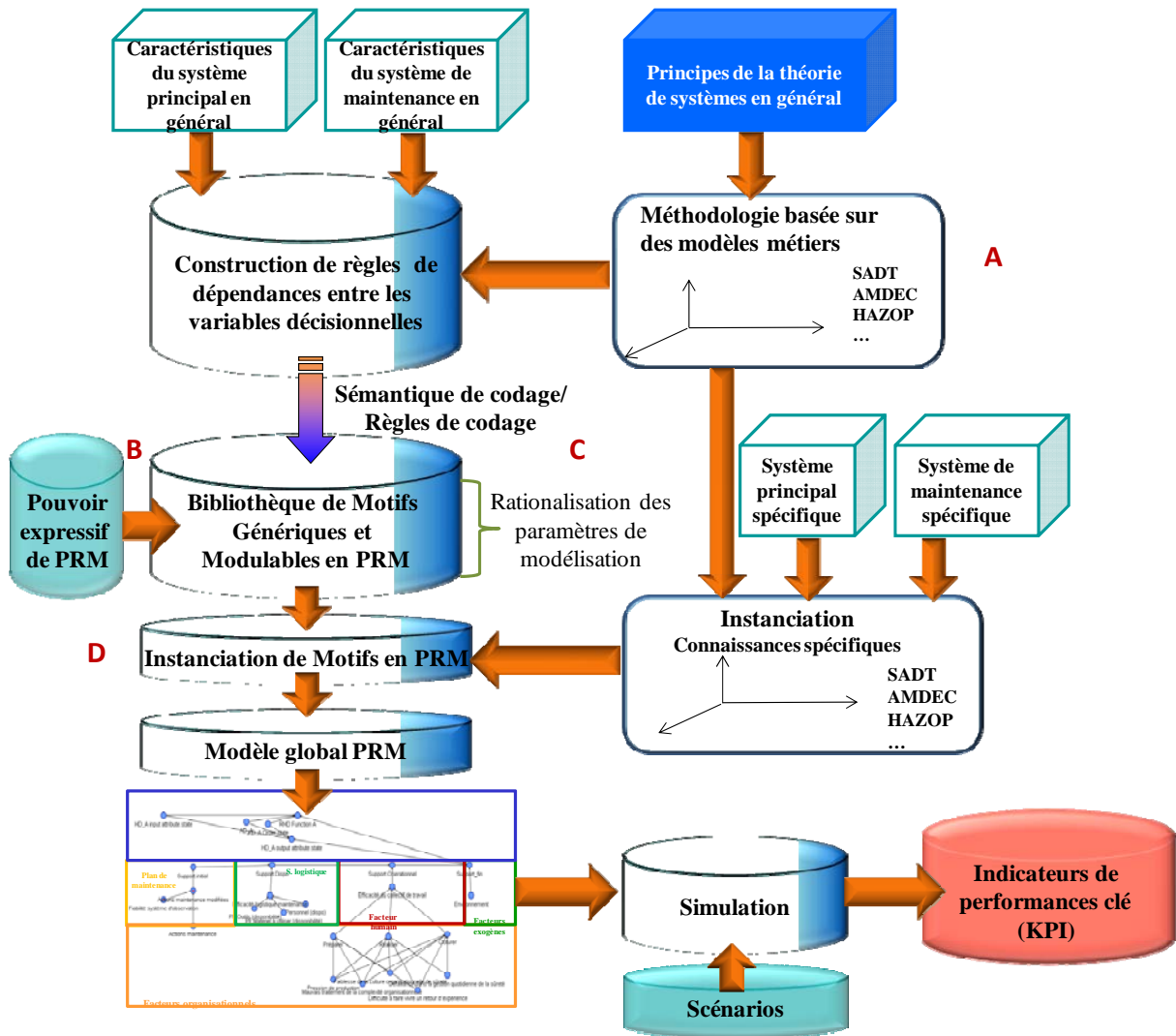


Figure 18. Méthodologie pour la création des motifs génériques pour l'évaluation des stratégies de maintenance

Chapitre 2

Méthodologie de formalisation des connaissances pour l'évaluation des stratégies de maintenance

2.1. Introduction

Par rapport au besoin, identifié au chapitre 1, de disposer d'un modèle « exécutable » pertinent pour l'évaluation des stratégies de maintenance, émerge une première problématique scientifique relative à la construction de ce modèle pour qu'il représente ce qui est réellement attendu en termes de connaissances, de critères, de relations entre ces critères, etc. (pallier à une construction empirique). En ce sens cette construction doit se baser sur un ensemble de règles sémantiques.

Ces règles doivent donc être définies sur les principes de formalisation applicables au SP, au SM et à l'interaction SM/SP. Ce chapitre présente ainsi différentes caractéristiques du SP et du SM, ses interactions mais aussi les interactions entre les différents systèmes contributeurs autour du SM. L'étude de ces interactions est basée sur des éléments de la théorie du système général (Bertalanffy, 1976) en proposant une méthodologie de référence qui formalise et met en évidence les relations de dépendances entre les différentes variables d'une stratégie de maintenance et la manière dont celles-ci impactent les performances globales. Cette méthodologie s'appuie sur la décomposition des systèmes suivant différents points de vue complémentaires (Figure 18- Point A) donnant naissance à des modèles métiers.

La méthodologie de structuration des connaissances intègre donc l'enchaînement des différents modèles métiers permettant de fonder les relations de dépendances entre les variables. Ces règles sémantiques seront ensuite exploitées pour développer des motifs de modélisation génériques et quantifiables.

2.2. Formalisation de connaissances d'un système

2.2.1. Les vues d'un système

Pour évaluer les stratégies de maintenance, il faut tout d'abord identifier les relations de dépendance parmi les variables décisionnelles du SM et du SP. Ainsi, il devient nécessaire de traiter ensemble le SP et le SM, leur complexité et leurs interactions. Pour cela, nous nous basons sur des représentations de systèmes réalisées sous la forme de modèles. Ces modèles permettent de formaliser et de structurer la connaissance par des règles (sémantiques) de construction qui autorisent ensuite la création de motifs sémantiques dans des formats exécutables et quantifiables.

Les règles sémantiques sont quant à elles indépendantes de tout formalisme exécutable pour garantir lors de la transposition vers les motifs, des principes de généricité et réutilisation.

Ainsi, pour formaliser les connaissances d'un système en général, que ce soit de nature technique ou de nature humaine et organisationnelle, nous nous appuyons sur la théorie du système général (Bertalanffy, 1976), qui permet de représenter le système à travers différentes perspectives (points de vue) afin d'appréhender plus facilement la complexité. Une vue correspond à une représentation d'un aspect particulier de l'élément modélisé. Les vues permettent de partitionner l'étude d'un système afin de proposer à l'analyste le sous-ensemble d'information nécessaire et suffisant à sa prise de décision. L'usage des vues permet donc de découper le problème global d'analyse ou de conception du système en sous-problèmes plus facilement résolubles (David, 2009) (AFIS, 2009).

En ce sens, les points de vue d'un système sont représentés à travers des modèles. Un modèle est une représentation de la réalité exprimée à travers un formalisme (ou langage) défini par des concepts de modélisation et à destination d'un utilisateur. Les modèles peuvent être utilisés pour représenter ce que le système fait, ce qu'il contrôle, comment il fonctionne, comment il réalise ses fonctions et ce qu'il produit (Vernadat, 1996). La modélisation peut ainsi s'effectuer souvent de manière à délivrer une représentation (Franchini, 1997) :

- graphique, afin d'appréhender plus facilement les interactions entre les différentes activités,
- qui permette une compréhension logique et progressive de l'organisation,
- qui intègre une description des éléments classiques de caractérisation du processus (activités, entrées/sorties et ressources) (Deeb, 2008).

Les modèles métiers permettent une description générique d'un aspect propre à un métier. Les modèles métiers classiques (sans être exhaustif) pour représenter un système sont généralement (Vernadat, 1996) des :

- Modèles d'activités, spécifiant les fonctions réalisées par le système,
- Modèles de ressources, intégrant les moyens et leur configuration pour réaliser les fonctions du système,
- Modèles d'information, indiquant les données et leurs relations par exemple dans un système d'information de l'entreprise,
- Modèles de produit, représentant la géométrie et les performances du produit,
- Modèles économiques, spécifiant une vision pour une évaluation de l'effectivité financière,
- Modèles de décision, fournissant des informations afin de faciliter la prise de décisions.

L'ensemble de ces modèles permet de comprendre et de représenter le fonctionnement d'un système. Pour formaliser les différents points de vue d'un système tout au long du cycle de vie du SP, des guides ou cadres de modélisation ont été créés.

Ces cadres fournissent des méthodologies qui intègrent les différents points de vue dans les différentes phases du cycle de vie d'un système permettant de positionner les modèles pour

garantir la prise en compte des différents aspects du système ainsi que de garantir la cohérence dans les phases de modélisation (i.e. GERAM (Bernus et Nemes 1996)).

Pour considérer les interactions entre le SM et le SP, nous avons choisi de structurer et organiser les modèles en s'appuyant sur le cadre de modélisation Zachman (Sowa et Zachman, 1992). Ce cadre permet de mettre en œuvre une analyse formelle des systèmes. Il intègre six perspectives basées sur des questions de base :

- Qui ? : définit les acteurs, les rôles de ces acteurs et l'unité organisationnelle responsable de la phase en cours.
- Quoi ? : porte sur les matières et les informations qui sont traitées.
- Où ? : indique l'emplacement géographique des opérations.
- Quand ? : décrit la liste des événements des opérations.
- Comment ? : fournit une représentation des processus ainsi que des flux d'entrée et de sortie.
- Pourquoi ? : donne les motivations et les objectifs des processus.

De plus, il considère les différentes visions des parties prenantes : Visionnaire, Propriétaire, Concepteur, Réalisateur, Sous-traitant et Exécutant (visionary, owner, designer, builder, implementer, worker). Pour formaliser les variables décisionnelles qui impactent les évaluations des stratégies de maintenance, nous proposons de formaliser les points de vue suivants (Medina-Oliva et al., 2011) (Figure 19):

- Fonctionnel : décrivant les activités réalisées par un système, les échanges des flux ainsi que l'architecture de ses fonctions;
- Dysfonctionnel : indiquant, en complément du point de vue fonctionnel, les opérations anormales d'un système;
- Informationnel : signalant les relations d'association ou composition par exemple entre les variables d'un système ;
- Organisationnel : spécifiant le contexte issu de l'organisation ou management d'un système.

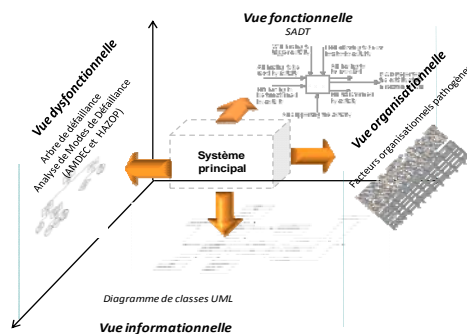


Figure 19. Différents points de vue d'un système

La première étape de la modélisation est contextuelle (Figure 20). Dans ce point de vue nous établissons l'objectif de la modélisation : l'évaluation des stratégies de maintenance. Ainsi nous définissons ce qui sera modélisé pour remplir les exigences des utilisateurs. Dans notre cas, nous modélisons le processus de production associé au SP et l'impact du SM sur le SP. Ensuite, dans un niveau d'abstraction inférieur, les modèles fonctionnel et informationnel sont définis, et les concepts généraux liés à l'évaluation des stratégies de maintenance sont établis en utilisant des modèles métiers enrichis sur la base de principes de construction qui permettront d'aider à l'instanciation d'un modèle spécifique (vision conceptuelle). Suite à la formalisation des connaissances dans des modèles, il est nécessaire de disposer d'un format exécutable permettant de quantifier des performances issues de la définition des stratégies de maintenance. Pour cette raison, dans la vision logique nous spécifions la procédure pour créer des motifs génériques exécutables et quantifiables à partir des informations récoltées dans les modèles métiers. Finalement, ces motifs peuvent être instanciés pour créer un modèle global exécutable sur un cas particulier (vision physique). De cette façon le cadre de Zachman permet de guider la modélisation des systèmes ainsi que d'obtenir une vue holistique du système modélisé.

Les étapes de modélisation au niveau conceptuel sont traitées dans ce chapitre, les étapes correspondantes au niveau logique sont traitées dans le chapitre 3 et finalement le modèle correspondant à la phase physique est développé dans le chapitre 5. Comme ces modèles sont basés sur de règles génériques bien définies, les différents points de vue sont applicables aussi bien aux deux systèmes : le SP et le SM.

	Quoi? (Objet)	Comment? (Traitement)	Où? (Réseau)	Qui? (Acteurs)	Quand? (Temps)	Pour quoi? (Motivation)
Contextuel (Visionnaire)	Documents textuels et normes FD X- 60000, MIMOSA, IECDIS 62264	Processus de production et de maintenance		Modélisateur du SP et du SM		Evaluer et quantifier des stratégies de maintenance
Conceptuel (Propriétaire)	Modèle métier d'objets - diagramme de classes	Modèles métiers fonctionnel, dysfonctionnel-SADT, AMDEC, AdF...				Supporter l'approche sur l'évaluation des stratégies de maintenance
Logique (Concepteur)		Motifs génériques PRM				Définir les relations de dépendances des variables décisionnelles pour l'évaluation des stratégies de maintenance
Physique (Réalisateur)		Modèle global PRM instancié		Responsable de maintenance		Construire un modèle exécutable pour quantifier les performances
Détaillé (Sous-traitant et Exécutant)						

Figure 20. Positionnement de notre méthodologie dans le cadre de modélisation Zachman

2.2.2. Formalisation de connaissances appliquées au SP

2.2.2.1. Vue fonctionnelle du SP

a. Objectifs

Selon la norme (AFNOR X 50-151, 2007) : "L'analyse fonctionnelle est une démarche qui consiste à rechercher, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions du produit (système) attendues par l'utilisateur".

L'objectif de ce point de vue est de formaliser l'ensemble des fonctions supportées par le SP nécessaires pour l'obtention d'un produit puis de définir les liens entre ces fonctions, mais aussi entre le SP et son environnement. Les liens sont formalisés par des échanges de flux (matière, énergie, information) entrant et sortant. En ce sens, nous faisons l'hypothèse que l'une des performances principales du SP est la conformité du flux de sortie, c'est-à-dire qu'une fonction est bien réalisée lorsque les exigences liées au flux de sortie (temps, forme et espace) sont remplies (Cocheteux, 2010). Ainsi, l'analyse fonctionnelle d'un système industriel consiste à représenter par des relations causales les interactions entre les fonctions, et ce à chaque niveau : système, sous-système (fonction intermédiaire) et composant (fonction élémentaire). Ce type d'analyse supporte donc la vision multi-niveaux d'abstraction demandée pour la prise de décisions et elle permet une représentation de systèmes multi-composants en indiquant les dépendances fonctionnelles existantes dans le SP.

Pour l'évaluation d'une stratégie de maintenance, cette perspective est importante car elle permet de propager les performances du SM et son impact sur le fonctionnement du SP. Cette propagation se fait à travers les échanges de flux entre les deux systèmes. L'analyse fonctionnelle permet d'observer l'impact d'une stratégie de maintenance au niveau des flux sortant d'une fonction du SP principalement sur les performances liées au taux de production et à la qualité produite.

b. Extraction des connaissances et représentation du point de vue fonctionnel

Pour construire l'analyse fonctionnelle (ou plus logiquement de fonctionnement), la connaissance peut être obtenue à partir des informations collectées sur le terrain (i.e. interviews) ou des diagrammes de processus comme le diagramme de processus et flux (Process flow diagram- PFD) ou des diagrammes d'instrumentation et canalisation (Piping and instrumentation diagram- P&ID).

Ce point de vue est menée dans notre approche avec l'outil de modélisation « Structured Analysis and Design Technique » (SADT) (Ross, 1985). Cet outil permet de représenter : les flux, entrant et sortant, de matière, d'énergie et d'information, les fonctions, les relations entre les fonctions ainsi que les supports des fonctions. Aux principes de la méthode SADT initiale, nous y intégrons des éléments de la théorie du système général (i.e. modalités de flux) comme proposé dans les travaux de thèse de (Mayer, 1995).

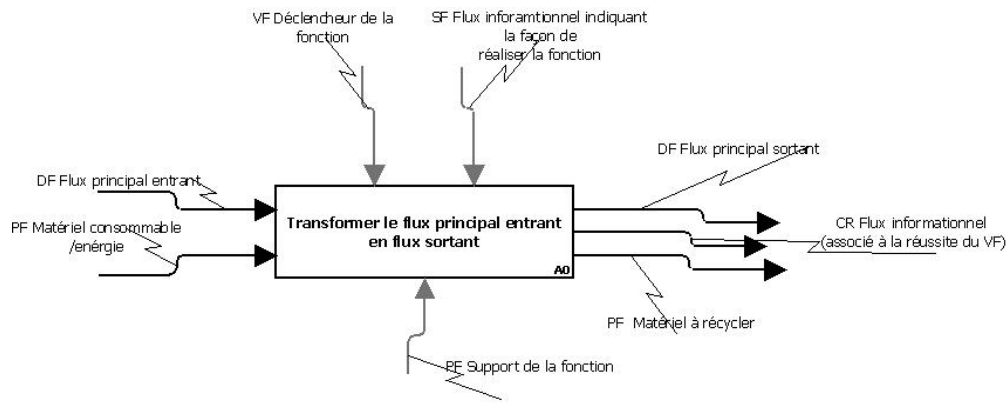


Figure 21. Représentation des flux d'une fonction

Une fonction est perçue ainsi à travers des modalités de flux de quatre types (Figure 21):

- 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.

Nous considérons plus spécifiquement un autre flux nommé « Compte-rendu » représentant le résultat informationnel de la fonction. Ce flux est une représentation du « VF sortant » indiquant la réussite de la mission de la fonction.

Chaque fonction consomme des flux comme : un flux principal qui sera transformé « DF entrant », d'autres flux permettant de réaliser la fonction comme l'énergie par exemple « PF entrant » ainsi que des flux informationnels ou événementiels de type « SF entrant » ou « VF entrant ». Ces flux sont transformés vers des flux sortants dont le produit final « DF sortant » mais aussi sur des flux de déchets matériels ou de l'énergie à recycler « PF sortant ». Dans notre étude nous nous focalisons principalement sur la conformité du flux de sortie principal « DF sortant » mais les principes appliqués étant totalement génériques ils sont transposables sur d'autres types de performances orientées plus sur les flux PF à recycler en lien avec l'environnement comme l'étude de propriétés de déchets (i.e. caractéristiques physiques, débit, etc.).

Toutefois, dans l'analyse SADT la spécification uniquement de deux flux est obligatoire : le déclenchement de la fonction « VF entrant » et le flux principal sortant « DF sortant ».

SADT est également une méthode cartésienne qui supporte la décomposition des fonctions (analyse descendante), modulaire, hiérarchique et structurée permettant de spécifier différents niveaux d'abstraction .

En résumé, la finalité de chaque fonction est de transformer un « flux entrant DF » en un « flux sortant DF ». Pour cela, chaque fonction consomme donc différents types de flux de matières, informationnels, etc. pour en créer d'autres. Chaque flux est ensuite à caractériser par ses propriétés.

2.2.2.2. Vue informationnelle d'un système industriel

a. Objectifs

Chaque flux est caractérisé par un ensemble de variables d'états relatives aux propriétés morphologiques, spatiales ou temporelles des objets qui le composent (i.e. pièces et flux de pièces) et par des variables de flux qui s'expriment en quantité d'objets par unité de temps (comme un débit) (Mayer, 1995). Par la suite, nous proposons de représenter les variables d'états et les variables de flux sous la dénomination unique d'attribut de flux.

En règle générale, pour mesurer la performance d'une fonction, il est nécessaire de spécifier un ou plusieurs indicateur(s). Dans le cadre de l'approche proposée, nous posons l'hypothèse que la performance d'une fonction s'évalue directement sur les attributs des flux qu'elle produit, c'est-à-dire une fonction a une bonne performance si l'ensemble des attributs des flux sortants sont conformes par rapport à un niveau attendu. La vision informationnelle nous permet d'identifier ces propriétés ou attributs de flux.

b. Extraction des connaissances et représentation du point de vue informationnel

Cette vision permet d'observer des dépendances entre les objets qui composent le système industriel ainsi que d'identifier les attributs des flux.

La vue informationnelle est menée à travers un diagramme de classe UML qui représente des objets constitutifs d'un système et les différentes relations qui existent entre eux (classes, compositions, associations, attributs, etc.) (Flower, 2004). Les éléments principaux que nous utilisons dans ce diagramme sont : les classes qui décrivent le comportement et les caractéristiques communes d'un ensemble d'objets et les attributs qui décrivent les caractéristiques structurelles ou propriétés d'une classe. Par exemple, une classe qui prend en compte des caractéristiques communes à différents objets comme vanne, pompe et turbogénérateur peut être la classe « composant » et ses attributs (sans être exhaustif) sont l'identifiant, la consommation énergétique, la position dans le processus, la disponibilité, etc. Chaque classe est représentée par une boîte. Dans notre cas elle est divisée en deux parties : le nom de la classe et la définition de ses attributs.

Les relations que nous exploitons dans ce diagramme sont : l'héritage, la composition, l'agrégation et l'association. L'héritage factorise des propriétés communes à plusieurs classes dans une classe généralisée puis celle-ci est utilisée pour créer des sous-classes qui héritent des propriétés de la classe généralisée (Koller et Pfeffer, 1998). L'héritage se représente graphiquement par une flèche triangulaire pointant sur la classe généralisée. La composition détermine une notion de contenance de plusieurs classes (parties d'un tout) vers une classe qui représente le tout. Le côté du tout est indiqué par un losange plein. L'agrégation montre aussi une relation de contenance n'étant obligatoire pas structurellement mais plus conjoncturellement, par exemple, pour représenter un bureau contenant des livres. Le côté du tout est indiqué par un

losange vide. Finalement, l'association établie une relation sémantique entre deux classes d'égal à égal, c'est-à-dire qu'il n'y a pas la notion de contenance comme dans la composition ou l'agrégation. Elle est représentée par une ligne pleine entre deux classes et elle comprend également des relations de multiplicités entre les deux classes. La multiplicité indique le nombre d'instance de chaque classe dans ce type de relation (Roques, 2009), (Friedenthal et al., 2008) et (Fowler, 2004).

Cette vue pour le SP est développée en tenant en compte de connaissances représentées dans les diagrammes de classe de (MIMOSA, 2009) et la norme (IECDIS 62264, 2003). La Figure 22 présente la vue informationnelle générique des fonctions assurées par le SP. Il est possible d'observer des relations d'association : un composant supporte une ou plusieurs fonctions élémentaires (MIMOSA, 2009). Celle-ci montre également des relations d'agrégation des fonctions : une fonction intermédiaire possédant une ou plusieurs fonctions élémentaires. De la même façon le SP contient un ou plusieurs composants (IECDIS 62264, 2003). Les fonctions et les flux possèdent des attributs, comme une identification ID, un niveau d'abstraction pour les fonctions, et des attributs de forme, espace ou temps pour les flux. Dans ce diagramme nous spécifions aussi des attributs du composant et du système : par exemple pour la classe « composant » certains de ces attributs sont : sa disponibilité, sa fiabilité, sa maintenabilité... (IECDIS 62264, 2003). De cette façon, la vue informationnelle décrit certains attributs et relations complémentaires à la vue fonctionnelle.

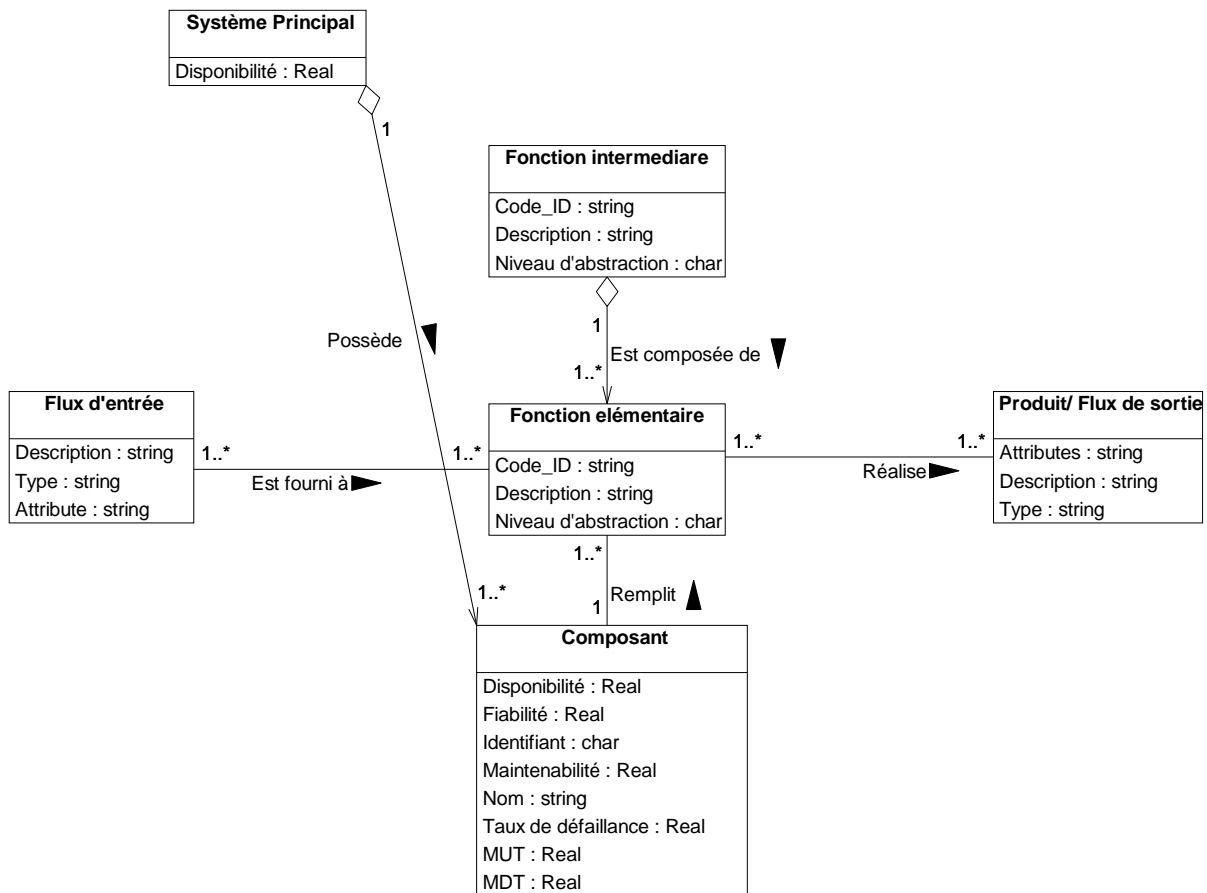


Figure 22. Représentation informationnelle d'une fonction et ses flux

En particulier dans le domaine de maintenance une fois que le fonctionnement du système et les attributs des flux qui le composent sont étudiés, il est essentiel d'étudier leur complément, leur dysfonctionnement. Dans ce cas, la déviation d'un attribut du flux est alors objet d'étude du dysfonctionnement du système.

2.2.2.3. Vue dysfonctionnelle du SP

a. Objectifs

Le modèle fonctionnel sert de base pour développer l'analyse dysfonctionnelle dont les objectifs sont d'identifier les états dégradés et défaillants des fonctions et de ses supports (généralement des composants) mais aussi les déviations des flux pour ensuite déterminer les causes et les conséquences de ces états sur le comportement du système industriel. En ce sens, les définitions des déviations et détériorations sont :

- La déviation de flux est liée à la variation qualitative ou quantitative d'un attribut de flux par rapport à sa valeur nominale.
- La détérioration d'un support est relative à l'apparition d'un mécanisme physique de détérioration.

A partir de l'analyse fonctionnelle, il est possible de déterminer les causes et les conséquences de la défaillance d'une fonction, sur le principe suivant :

- La cause potentielle de la dégradation d'une fonction est la déviation d'un attribut de flux entrant (cause externe) ou bien la détérioration de son support de réalisation (cause interne).
- L'effet potentiel de la dégradation d'une fonction est la déviation d'un attribut de ses flux sortants ou de la détérioration du support de la réalisation (Léger, 1999) (Figure 23).

L'une ou l'autre provoque par la suite l'apparition d'un mode de dégradation ou de défaillance d'une fonction.

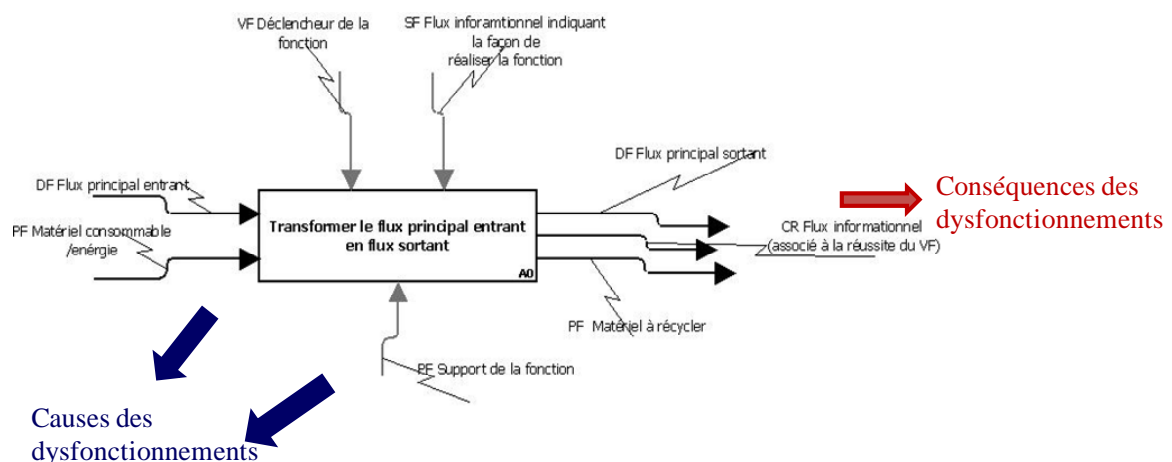


Figure 23. Les causes et les conséquences de la défaillance d'une fonction

De plus, les échanges des flux entre fonctions permettent d'établir des relations de causalité entre deux (ou plusieurs) fonctions : si la fonction courante est dégradée, elle produira un flux de sortie

dévié. Ce flux de sortie dévié devient le flux entrant de la fonction suivante et en conséquence, la fonction réceptrice du flux dévié produira des flux dégradés et ainsi de suite (Figure 24).

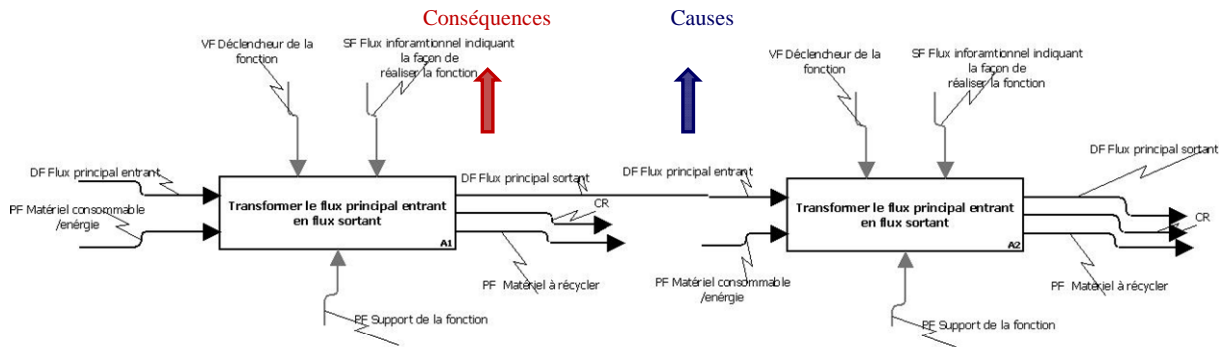


Figure 24. Relations de causalité entre deux fonctions (principe de propagation)

Dans l'analyse dysfonctionnelle, il existe également des relations entre les différents niveaux d'abstraction. Par exemple un mode de dégradation dans un niveau d'abstraction « n » (e.g. A0) (Figure 25) aura pour conséquence une dégradation/déviations dans un niveau d'abstraction « n+1 » (e.g. A-0). Inversement, un mode de dégradation dans un niveau « n+1 » aura pour cause un mode de dégradation dans la fonction de niveau d'abstraction inférieur (dans notre cas la fonction de niveau « n »).

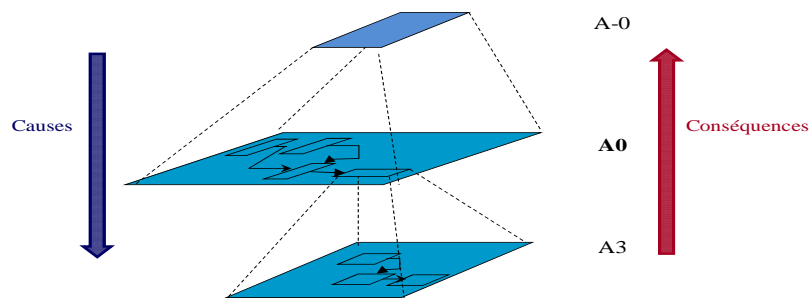


Figure 25. Représentation des relations entre les différents niveaux d'abstraction

L'analyse dysfonctionnelle comprend aussi la recherche de l'ensemble des événements élémentaires, ou combinaisons d'événements, qui conduisent à un événement redouté et la recherche des liens logiques entre les composants indispensables au succès de la mission du système.

b. Extraction des connaissances et représentation du point de vue dysfonctionnel

L'analyse dysfonctionnelle consiste donc à identifier les modes de dégradation ou de défaillance des fonctions puis à déterminer leurs causes et leurs conséquences sur les autres fonctions. Dans notre cas, cette analyse est menée par la mise en œuvre des méthodes propres au domaine de la sûreté de fonctionnement (Villemeur, 1988) :

- Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) : A partir de l'analyse fonctionnelle, l'AMDEC vise à la spécification qualitative des modes nominaux ainsi que des modes de dégradations des fonctions et puis l'identification des causes et conséquences de défaillances. Cette méthode supporte le principe de causalité expliqué précédemment.

- Hazard and Operability Study (HAZOP) : est une méthode qualitative utilisée pour identifier les déviations des propriétés de flux. Elle propose également des déviations génériques afin de guider l'analyste. L'HAZOP complète alors l'AMDEC puisque l'AMDEC se focalise généralement sur l'étude des dégradations des composants autant que l'HAZOP se concentre sur les anomalies au niveau des flux.
- Arbre de défaillance (AdF) : il s'agit d'une méthode quantitative qui analyse les liens logiques d'événements à partir d'un événement redouté jusqu'à l'identification de la cause. L'AdF est une méthode déductive de nature « top-down », c'est-à-dire qu'en partant de l'événement redouté (l'événement le plus général) les événements élémentaires qui l'ont produit sont recherchés (causes de l'événement le plus général). Cette méthode utilise des informations issues de l'AMDEC pour établir les liens logiques entre les différentes causes de défaillances. Ces liens logiques permettent de définir la fonction de structure du SP, c'est-à-dire, la configuration fonctionnelle des composants pour réaliser la fonction du SP.
- Diagramme de Fiabilité (DF) : c'est une méthode qui représente, sous la forme d'un diagramme de structure, l'architecture fonctionnelle des composants. De cette façon le DF permet d'identifier les relations série-parallèle à travers des fonctions logiques (ET, OU...) entre composants. En ce sens, l'AdF et le DF établissent les liens logiques basés sur la configuration fonctionnelle des composants (fonction de structure) pour déterminer les probabilités de réussite de la mission du SP ou leur complément, la probabilité de non-réussite de la mission (i.e. mode de défaillance du SP).

La vue dysfonctionnelle est alors représentée par divers outils avec des liens parmi eux, certains de nature qualitative et d'autres plus quantitatifs mais qui se complètent à travers des relations de causalité ou en établissant d'autres aspects comme des dépendances entre les composants. Cette vue permet d'identifier et comprendre comment les événements non-désirables peuvent se propager impactant les performances du SP. L'étude du dysfonctionnement devient essentielle afin d'établir des stratégies de maintenance qui peuvent éviter ou diminuer l'occurrence de ces événements.

En synthèse de ces différentes représentations (fonctionnelle, dysfonctionnelle...) nous pouvons mettre en évidence une première liste de différentes règles sémantiques à partir desquelles seront construits nos motifs :

- Le flux de sortie « DF » est considéré en état nominal lorsque les flux entrants à la fonction ainsi que le support sont en état nominal.
- Le « flux de sortie DF » est considéré comme conforme lorsque ses attributs (définies par des exigences de temps, forme et espace) sont conformes (i.e. état nominal).
- Une déviation de « flux sortant DF » d'une fonction produira des déviations de « flux entrants DF » dans les fonctions suivantes (propagation de la déviation/défaillance à travers des échanges des flux entre fonctions).
- Une déviation de « flux sortant DF » (ou un mode de dégradation) dans un niveau d'abstraction inférieur est la cause de déviation du « flux sortant DF » dans le niveau d'abstraction supérieur et de même un mode de dégradation/déviation dans un niveau

d'abstraction inférieur a comme conséquence une dégradation/déviations dans un niveau supérieur.

Pour conserver une vision cohérente avec la formalisation des connaissances du SP, nous proposons d'appliquer au SM les mêmes points de vue expliqués précédemment pour le SP : fonctionnel, dysfonctionnel et informationnel en considérant l'impact de la maintenance sur les performances du composant et du SP afin de répondre à la problématique scientifique énoncée dans le chapitre I.

2.2.3. Formalisation de connaissances appliquées au SM

2.2.3.1. Vue fonctionnelle du SM

a. Objectifs

Ce point de vue permet de représenter à un niveau macroscopique la fonction principale du SM qui est de garantir les performances du SP. De plus, l'analyse fonctionnelle du SM permet de formaliser les relations avec d'autres systèmes contributeurs au SM (comme la logistique...). Cette perspective permet d'établir les performances du SM, c'est-à-dire le niveau de conformité des flux sortants du SM suite à la réalisation de sa fonction.

b. Extraction des connaissances et représentation du point de vue fonctionnel du SM

Selon la norme (FD X 60-000, 2002), la maintenance est définie comme l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise. En conséquence, les interventions de maintenance peuvent être représentées comme une fonction puisqu'elles transforment l'état d'un composant (dégradé, défaillant) vers un autre état amélioré (réparé, fonctionnel). En tenant compte de la théorie du système général différents types de flux peuvent être pris en compte entre les fonctions du SP et du SM (Mayer, 1995) en définissant la fonction principale du SM « maintenir l'équipement » qui représente les activités réalisées par le SM pour le MCO du SP.

Pour cette fonction, les flux entrants sont (Figure 26) :

- L'équipement à maintenir qui constitue le devoir-faire (DF),
- Les outils, les pièces de rechanges, le personnel nécessaire pour réaliser l'intervention représentant le pouvoir-faire (PF1, PF2, PF3, PF4),
- Le plan de maintenance constitue le vouloir-faire (VF). C'est un flux informationnel contenant toutes les actions de maintenance et les déclenchant à travers des indicateurs de dégradation/déviations, des connaissances calendaires (GMAO) ou la défaillance du composant, selon le type de stratégie de maintenance.

Au niveau des flux sortants :

- Le DF est l'équipement maintenu.

- Le PF5 est, par exemple, des matériels à recycler.

Dans cette représentation le flux SF n'est pas spécifié puisque nous l'intégrons dans la suite sur la vue organisationnelle-humaine (i.e. l'importance des procédures pour la bonne réalisation d'une intervention de maintenance).

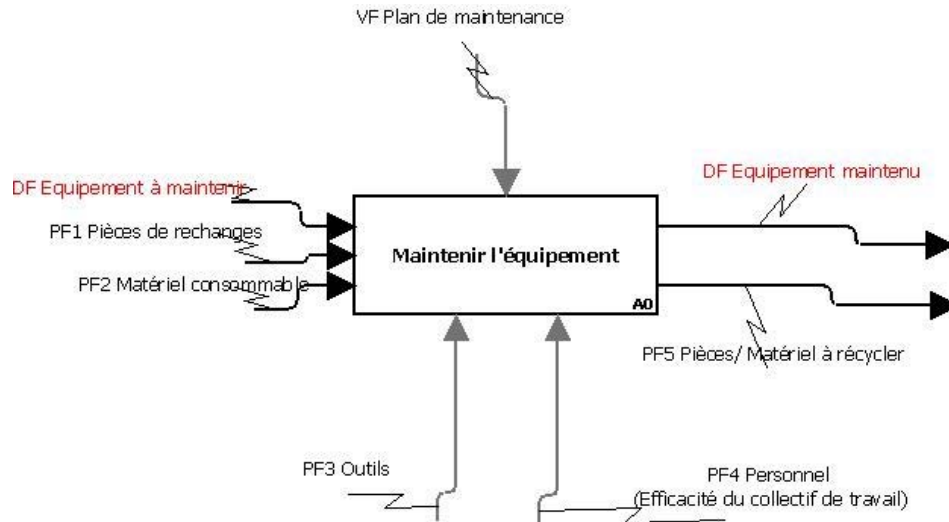


Figure 26. Fonction principale du SM

De cette façon il est possible d'observer que la fonction « maintenir l'équipement » transforme un flux principal (DF) entrant « DF Equipement à maintenir » et améliore son état vers un équipement maintenu, normalement plus performant. Pour cela, cette fonction consomme des pièces de rechanges, des outils, du personnel et des informations événementielles et rejette des pièces détériorées (mais pas uniquement). Ce modèle est générique et applicable à chacun des composants du SP.

Ces différents flux entrants possèdent un ou plusieurs attributs importants pour la réussite de la fonction. L'analyse de ces propriétés des flux est représentée dans la vue informationnelle.

2.2.3.2. Vue informationnelle du SM (objet)

a. Objectifs

Dans la vue informationnelle, les attributs des flux entrants et sortants de la fonction « maintenir l'équipement » sont pris en compte. La conformité des attributs du flux permettra de réaliser la fonction principale du SM de façon normale. Ceci permet donc d'identifier les relations entre les critères à tenir en compte pour réaliser une évaluation de stratégie de maintenance décrits dans le chapitre 1.

b. Extraction des connaissances et représentation du point de vue informationnel

Les attributs des flux relatifs à la fonction « maintenir l'équipement » sont représentés dans un diagramme de classe (Figure 27). Ce diagramme montre la relation entre les différents objets ainsi que les attributs de ces objets. Ce point de vue introduit d'autres éléments qui ne sont pas représentés dans la vue fonctionnelle du SP comme les interactions du composant avec un environnement ou la spécialisation des actions de maintenance. Aussi il représente les attributs de

chaque action de maintenance comme les coûts associés, sa durée et son efficacité. Ce diagramme est construit à partir des diagrammes de classe de (MIMOSA, 2009) et de la norme (IECDIS 62264, 2003).

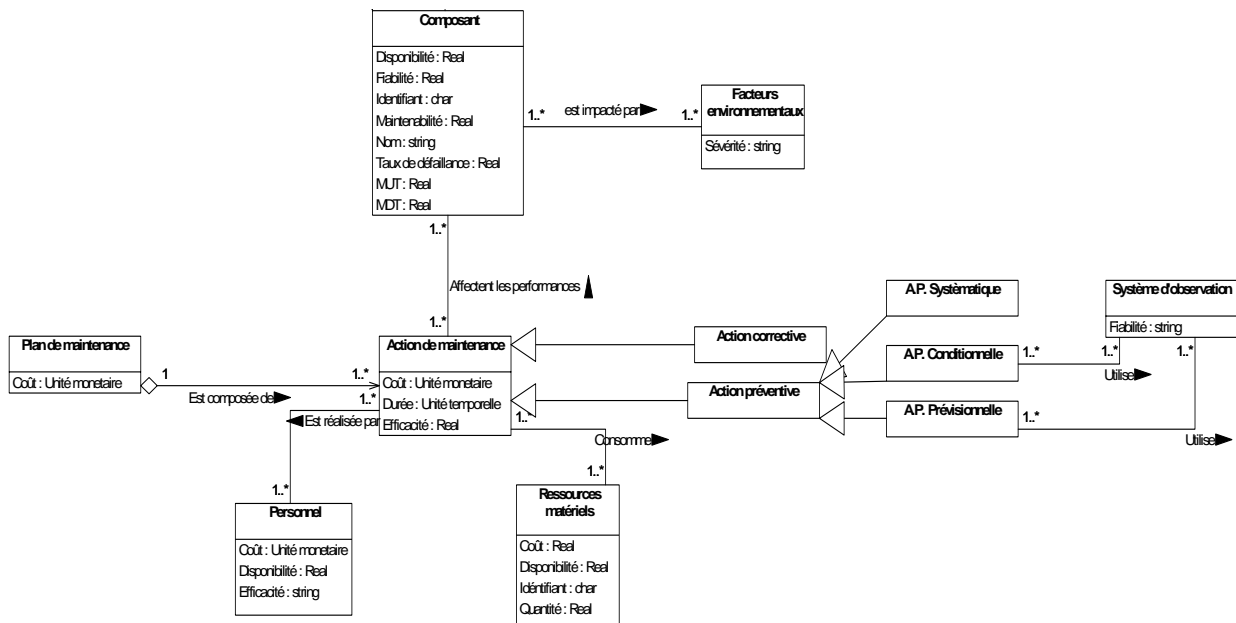


Figure 27. Relation entre les objets de la maintenance et ses attributs

Les éléments les plus importants à caractériser dans cette vue informationnelle sont :

- Un plan de maintenance est composé de l'ensemble des actions de maintenance nécessaire pour le MCO du composant. En ce sens : Plan de maintenance = {actions de maintenance}. Une action de maintenance quelconque est caractérisée principalement par deux attributs : sa durée (délais de la maintenance) et son impact sur l'état du composant (son efficacité) qui modifie son MUT.
- Les « actions de maintenance » ont des sous-classes d'actions de maintenance : la maintenance corrective et la maintenance préventive. La maintenance préventive a elle-même trois sous-classes : systématique, conditionnelle et prévisionnelle (Norme NF EN 13306, 2001).
- Les actions de maintenance conditionnelle et prévisionnelle sont modifiées en fonction de la « fiabilité du système d'observation » (en ce sens, une non-détection conduit probablement à une défaillance, et une fausse alarme conduit à une action préventive sur un composant en bon état (Zhao et al., 2007), (Fouladirad et al., 2008)).
- L'attribut « efficacité de l'action de maintenance » s'adresse à la modification de l'évolution du taux de défaillance et en conséquence de son MUT (Yanez, 2002) (MIMOSA, 2009).
- L'efficacité de l'action dépend aussi de l'efficacité du personnel, qui est définie par sa capacité de remplir correctement une fonction (Léger, 2009).

- L'environnement qui est un facteur externe à la maintenance, impacte l'évolution du taux de défaillance du composant. Si l'environnement est sévère alors les mécanismes de dégradation sont accélérés et le taux de défaillance augmente.
- L'attribut « durée de l'action de maintenance » est impacté par les ressources utilisées pour réaliser la maintenance comme les outils, pièces de rechanges, les matériels consommables, le personnel, etc. Ces ressources ont une propriété très importante pour la réalisation des actions de maintenance : leur disponibilité (IECDIS 62264, 2003), (MIMOSA, 2009).
- L'efficacité du personnel affecte aussi la durée de l'action.

Ainsi, comme explicité par (Knezevic, 2009), il est possible d'établir que la durée d'une action ou le temps d'intervention de maintenance (MDT) est une fonction de :

MDT = f(la nature de la défaillance, la maintenabilité du composant, la disponibilité de ressources matérielles et du personnel(logistique), efficacité du personnel) (et d'autres facteurs qui ne sont pas pris en compte comme les conditions environnementales)

Finalement, suivant (Dhillon, 1999) la disponibilité asymptotique du composant dépend de :

$$Dispo_composant = f(DA, MUT) = \frac{MUT}{MUT + MDT} \quad (5)$$

Une fois que les aspects fonctionnel et informationnel du SM sont définis, il est nécessaire d'analyser comment celui-ci peut être défaillant et les causes de ses propres dysfonctionnements.

2.2.3.3. Vue dysfonctionnelle du SM

a. Objectifs

Le point de vue dysfonctionnel permet l'identification des modes de dysfonctionnement de la fonction « maintenir le composant » ainsi que les déviations des flux entrants et sortants de la fonction. De cette façon une déviation d'un des attributs des flux d'entrée engendre un mode de défaillance dans cette fonction comme « ne maintient pas » ou « diminution des performances de maintenance ».

b. Extraction des connaissances et représentation du point de vue dysfonctionnel du SM

Cette vue est supportée par une analyse duale des défaillances/dégradations spécifiée avec l'AMDEC. De plus des déviations des propriétés des flux entrants (cause de la défaillance) et sortants (effet de la défaillance) sont étudiées avec l'HAZOP. Pour le SM, les déviations possibles des flux entrants sont :

- Indisponibilité des ressources (flux entrants) comme « PAS D'outil ».
- Inefficacité du personnel comme « MOINS D'efficacité ».

Lors de l'étude de ces différents facteurs et de ces déviations, il est possible de formaliser des relations de causalité entre les variables décisionnelles et l'impact qu'elles ont sur les

performances du composant. L'un des paramètres du composant est la durée moyenne de bon fonctionnement (MUT). De cette façon, il est possible de considérer l'impact des variables sur ce paramètre en considérant la règle sémantique suivante :

$$MUT = f(\text{nature des actions de maintenance}(\text{stratégie et efficacité de l'intervention}), \text{efficacité du personnel, environnement, ... autres paramètres}).$$

Le MUT de référence correspond à un MUT obtenu suite à la mise en œuvre des actions de maintenance de diverses natures avec une efficacité donnée. Ceci donne une durée moyenne de fonctionnement que nous appelons MUT_{PLAN} . Le Tableau 1 montre comment le MUT_{PLAN} est affecté par d'autres facteurs comme l'impact de l'environnement et l'impact de ressources tel que l'impact du facteur humain (règles sémantiques).

Lorsque le composant est soumis à des conditions pour lesquelles il n'a pas été conçu, il va se dégrader plus vite et la durée de fonctionnement diminuera. De même si les ressources ne sont pas efficaces l'intervention ne sera pas efficace et la durée de bon fonctionnement du composant diminuera. Par exemple si le personnel n'est pas compétent pour réaliser les actions de maintenance associées au composant, il est très probable que le composant soit mal réparé ce qui implique une diminution du MUT.

MUT plan	Environnement (E)	Efficacité de ressources (ER)	Relation logique de propagation	MUT environné
MUT_{PLAN}	Nominal (Nom)	Efficace	$E_Nom \wedge EP_Efficace \rightarrow = MUT_{PLAN}$	$= MUT_{PLAN}$
MUT_{PLAN}	Non-nominal (Non-Nom)		$E_Non-Nom \wedge EP_Efficace \rightarrow < MUT_{PLAN}$	$< MUT_{PLAN}$
MUT_{PLAN}	Nominal (Nom)	Non-efficace	$E_Nom \wedge EP_Non-Efficace \rightarrow < MUT_{PLAN}$	$< MUT_{PLAN}$
MUT_{PLAN}	Non-nominal (Non-Nom)		$E_Non-Nom \wedge EP_Non-Efficace \rightarrow \ll MUT_{PLAN}$	$\ll MUT_{PLAN}$

Tableau 1. Relations de causalités entre la durée de bon fonctionnement et des variables liées à la mise en œuvre des stratégies de maintenance

Il est aussi possible d'observer l'impact sur un autre paramètre : le temps moyen d'intervention d'un composant conduisant à l'indisponibilité du composant (MDT). Il dépend de la nature de la défaillance, de la complexité du composant et il est modifié par d'autres facteurs. En ce sens le MDT est modifié par :

$$MDT = f(\text{Disponibilité de ressources matérielles et du personnel}(\text{logistique}), \text{efficacité du personnel}).$$

Des relations de causalités (i.e. règles sémantiques) sont ainsi explicitées dans le Tableau 2.

Si l'un des flux d'entrée nécessaire pour réaliser la fonction « maintenir le composant » est dévié alors le MDT augmente. Cette déviation est plus importante lorsque plusieurs flux entrants sont déviés.

De la même manière, des relations logiques de propagation entre les variables décisionnelles des évaluations de stratégie de maintenance (flux entrants ou attributs du flux de la fonction « maintenir l'équipement ») et les facteurs qui l'influencent au niveau du SP sont représentés afin

de montrer comment ceux-ci impactent les performances du SP sur les coûts et la qualité produite (Tableau 3).

FE1- PF Dispo Outils	FE2- PF Disponibilité pièces de rechanges	FE3- PF Disponibilité Personnel	FE4- PF Efficacité Personnel	Relation logique de propagation	FS1- MDT _{PLAN}
FE2 Disponible	FE3 indisponible	FE4 indisponible	FE5 non- efficace	FE1 Disponible \wedge FE2 indisponible \vee FE3 indisponible \vee FE4 non-efficace \rightarrow > MDT	> MDT _{PLAN}
FE2 Indisponible	FE3 indisponible	FE4 indisponible	FE5 non- efficace	FE1 Indisponible \wedge FE2 indisponible \vee FE3 indisponible \vee FE4 non-efficace \rightarrow >> MDT	>> MDT _{PLAN}

Tableau 2. Relations de causalités entre la durée de hors service du composant et des variables liées à la mise en œuvre des stratégies de maintenance

Type de stratégie	FE1 – VF Déclencheur	FE2- PF Ressources	FE3- PF Personnel efficacité	FS1 Bénéfices (Performances du SP et du SM)	FS2 Qualité produite (Performances du SP)	Relation logique de propagation
Préventive systématique	FE1 Périodicité (T) inadéquate	FE2 indisponible	FE5 non- efficace	FS1 moins de bénéfices	FS2 nominal ou dégradé	FE1 T inadéquate \vee FE2 indisponible \vee FE3 Personnel non- efficace \rightarrow FS1 moins de bénéfices \wedge (FS2 nominal ou dégradé)
Préventive conditionnel ou prévisionnel	FE1 Seuil_inadéquate	FE2 indisponible	FE5 non- efficace	FS1 moins de bénéfices	FS2 nominal ou dégradé	FE1 Seuil_inadéquate \vee FE2 indisponible \vee FE3 Personnel non- efficace \rightarrow FS1 moins de bénéfices \wedge (FS2 nominal ou dégradé)

SM
SP

Tableau 3. Relations de causalités entre les variables décisionnelles des évaluations de stratégie de maintenance et les performances du SP et SM

Le Tableau 3 met en évidence que la déviation de l'un des attributs des flux de la fonction « maintenir l'équipement » impacte les performances du SM et du SP. Par exemple, dans le cadre de la maintenance systématique, une périodicité d'intervention préventive (trop petite) conduit à une diminution de la disponibilité et à une augmentation des coûts. De même, une périodicité (plus importante) conduit à des risques de défaillance plus grands, à un composant plus dégradé et à des performances qui peuvent être réduites et influencer la qualité du produit sortant. Aussi, comme observé pour le MDT, l'indisponibilité des ressources (i.e. outils, pièces de rechange, etc.) impactera la disponibilité du système ainsi que les coûts du SM et du SP. L'étude de ces facteurs et des leurs interactions est essentielle pour la quantification des performances et pour la prise de décisions. En ce sens, l'un des facteurs qui impacte les performances de la maintenance est le facteur humain lorsque c'est lui qui exécute l'opération. Pour cette raison, cette étude nous amène

à le caractériser ainsi que le contexte organisationnel qui l'entoure. Nous nous focalisons maintenant sur la vue organisationnelle-humaine laquelle synthétise les causes qui peuvent provoquer la déviation d'un attribut du flux entrant « inefficacité du personnel ».

2.2.3.4. Formalisation de connaissances sur la vue organisationnelle-humaine du SM

a. Objectifs

L'objectif de ce point de vue est d'analyser les caractéristiques organisationnelles du SM permettant de définir le contexte qui impacte les performances du humaines. Ensuite il est nécessaire d'étudier comment ces dernières impactent les performances du SM.

Dans le cas de la maintenance les erreurs humaines conduisent généralement à des réparations inefficaces où les fonctionnalités du composant ne sont pas complètement rétablies ou à des interventions préventives qui parfois diminuent les performances du composant. Ces dysfonctionnements sont à l'origine des accidents industriels (Pintelon et Muchiri, 2009), faisant de leur étude une problématique importante. En ce sens, la communauté de la fiabilité humaine s'est focalisée à expliquer quels sont les facteurs qui les produisent afin de entreprendre des actions correctives évitant leurs occurrences.

Dans les études réalisées par (Dhillon, 2006), (Schönbeck et al., 2010), (Øien, 2001) et (Nicholas, 2009) une diversité de facteurs pouvant engendrer les erreurs humaines est identifiée, ayant comme point commun l'impact du contexte organisationnel vers la performance du personnel dans la réalisation d'une action. En ce sens, l'environnement produit par les politiques managériales de l'entreprise affecte les capacités du personnel (au niveau physique ou psychologique). Par exemple, lorsqu'il y a une surcharge de travail, les opérateurs sont plus susceptibles de faire une erreur.

Dans ce point de vue, nous analysons donc les caractéristiques organisationnelles qui affectent la performance de l'homme. Nous nous focalisons sur l'impact des facteurs humains sur le SM. L'impact sur le SP pourrait être évalué de la même façon en considérant l'impact de ces facteurs sur les actions de conduite d'un système industriel. Cet aspect n'est pas considéré dans nos travaux car nous traitons les variables qui impactent les évaluations des stratégies de maintenance.

Les performances humaines ne sont pas mesurées de façon individuelle mais en considérant un collectif de travail. Cette hypothèse est justifiée par l'étude des caractéristiques communes à un ensemble d'individus qui agissent pour l'efficacité des actions de maintenance. Nous étudions donc les « performances » du collectif de travail dans la réalisation des actions de maintenance, ainsi que les causes qui produisent leur diminution. En effet, il est nécessaire d'étudier les causes qui produisent un comportement non-acceptable afin de les prendre en compte et de réduire la probabilité de créer des erreurs humaines (Mosleh et Chang, 2004).

Pour décrire le contexte d'une organisation, nous nous appuyons sur les travaux de (Léger, 2009), et (Pierlot et al., 2007). L'organisation est caractérisée par des facteurs organisationnels pathogènes (FOP), c'est-à-dire des facteurs qui ont une influence négative sur les performances humaines. Ces facteurs sont définis en se basant sur le principe suivant : pour déterminer si une organisation est en bonne santé, il est plus simple d'observer si elle a des symptômes que de

définir de façon exhaustive la liste de facteurs organisationnels qui assurent une bonne performance dans l'organisation.

b. Extraction des connaissances et représentation du point de vue organisationnel-humain

Il n'existe pas de consensus sur les FOPs qui impactent les performances (Øien, 2001), (Schönbeck et al., 2010), et (Nicholas, 2009). Une synthèse résultant de FOPs considérés dans les différents domaines d'application (industrie nucléaire, du pétrole, aviation, etc.) peut cependant être faite dans le Tableau 4. Les croix sur le tableau montrent les facteurs qui sont pris en compte sur chaque approche.

Facteurs organisationnels communs	Leger, 2009	Mohagheg, 2007	Øien, 2001	Kiassat, 2009	Nicholas 2009	Dhillon, 2009	Schönbeck, 2010	Kim et al., 2006	Papazoglou et al., 2003	Reason, 1990
Pression de production	X	X	X	X						X
Mauvais traitement de la complexité organisationnelle	X	X	X	X			X	X	X	X
Faiblesse de la culture organisationnelle de sûreté	X		X	X	X	X	X	X	X	X
Défaillance dans la gestion quotidienne de la sûreté	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Difficulté à faire vivre un retour d'expérience	X				X					
Absence de réexamen des hypothèses de conception (AR)	X	X		X	X	X				X
Faiblesse des organismes de contrôle	X	X	X		X					

Tableau 4. Analyse bibliographique de FOPs

Ces facteurs ont pu être validés dans le contexte industriel SKOOB. Les facteurs majeurs sont :

- *Pression de production*

La *pression de production* a un impact quand le temps, les budgets, les moyens et les ressources sont revus à la baisse mais que les objectifs restent constants, ce qui peut avoir pour effet une mauvaise adéquation entre des outils et les tâches à réaliser (Kiassat et Safaei, 2009).

- *Mauvais traitement de la complexité organisationnelle*

La *complexité organisationnelle* peut avoir plusieurs origines telles que la complexité technologique ou la multiplication des parties prenantes dans une organisation. Il est possible de l'observer à travers la coordination et la communication dans une organisation, qui peuvent faciliter ou non la performance du personnel.

- *Faiblesse de la culture organisationnelle de sûreté*

La *culture organisationnelle de sûreté* est l'ensemble de connaissances pratiques et valeurs partagées par l'organisation et elle vise à assurer que la sûreté des installations bénéficie à tout moment de toute l'attention requise pour atteindre les objectifs de production (Léger, 2009). La culture est considérée comme faible quand une différence entre les pratiques et les discours ou les politiques de management est observée. Un exemple de symptôme est la mauvaise qualité ou grande complexité des procédures essentielles pour informer le personnel de la manière adéquate pour réaliser une tâche alors que les bonnes pratiques intègrent également les procédures de sécurité, limitant les situations nécessitant des improvisations et donc les erreurs potentielles (Kiassat et Safaei, 2009) (Ce FOP intègre le flux « SF » (i.e. procédures) de la fonction « maintenir l'équipement »).

- *Défaillance dans la gestion quotidienne de la sûreté*

La *gestion quotidienne de la sûreté* consiste à mettre en œuvre les moyens nécessaires et les compétences du personnel pour assurer l'accomplissement des exigences de sûreté. Cela implique, par exemple, la formation du personnel pour remplir les tâches assignées. Lorsque les compétences du personnel ne sont pas suffisantes vis-à-vis de la tâche demandée (manque de formation ou expérience), des erreurs (e.g. un mauvais alignement d'un composant) peuvent être engendrées (Nicholas, 2009).

- *Difficulté à faire vivre un retour d'expérience*

Le *retour d'expérience* consiste à recueillir les connaissances issues d'expériences passées afin d'analyser les causes des dysfonctionnements. Cela permet de cibler des points d'amélioration et de prendre des mesures correctives efficaces (Nicholas, 2009).

- *Absence de réexamen des hypothèses de conception*

La *conception* de tout système technologique s'appuie sur des hypothèses de dimensionnement (technique et social). Il peut s'avérer, avec le temps, que certaines hypothèses deviennent caduques i.e. inadaptées aux caractéristiques du nouveau mode de fonctionnement nominal (Léger, 2009) comme l'illumination déficiente, humidité, etc. Celles-ci peuvent modifier les capacités d'une personne à réaliser une tâche correctement (Dhillon, 2009).

- *Faiblesse des organismes de contrôle*

Les *organismes de contrôle* supervisent et vérifient l'accomplissement des tâches liées à la sûreté du système pour examiner le respect des procédures et des activités en matière de sûreté (Øien, 2001).

Ces facteurs affectent donc le déroulement des actions humaines et plus spécifiquement les actions de maintenance qui comme proposée par (Léger, 2009) peuvent être décomposées en trois phases :

- La préparation qui concerne l'agencement des ressources et moyens (par le collectif de travail) pour satisfaire les exigences de l'action concernée.

- La réalisation qui comprend l'exécution de l'action ainsi que la mise en œuvre des ressources et procédures nécessaires.
- La clôture qui permet de vérifier la bonne exécution de l'intervention, le bon fonctionnement du système suite à l'intervention ainsi que la collecte et l'analyse des informations issues des travaux effectués.

Ces phases peuvent aider à caractériser l'efficacité des actions humaines. Ainsi « l'efficacité du collectif du travail » peut être ensuite un flux d'entrée dans la fonction « maintenir l'équipement ».

Les relations des FOPs sur les actions à réaliser ayant été identifiées, il se pose le problème d'affectation des poids pour l'influence de chacun des FOPs. Pour modéliser les impacts de facteurs organisationnels sur l'opérateur, (Øien, 2001), (Schönbeck, 2010), (Papazoglou et al., 2003), (Lock et Strutt, 1985) considèrent que tous les facteurs impactent mais avec des degrés différents.

D'après (Øien, 2001), l'un des outils les plus utilisés pour quantifier l'influence des facteurs organisationnels sont les réseaux bayésiens (RB). Ils offrent l'avantage de représenter de façon intuitive les relations de causalité. Cette capacité est importante puisque cela facilite le recueil des données auprès des experts organisationnels. De plus les RB permettent d'assigner différents degrés d'influence à chaque FOP. De cette façon, les capacités des RB permettent de supporter l'analyse organisationnelle. Pour quantifier l'influence des facteurs organisationnels sur les phases de l'action et sur l'efficacité du personnel, un modèle générique est proposée par (Léger, 2009). Ce modèle permet d'observer comment les FOPs impactent les performances dans chaque phase d'une action, ces actions faisant partie de l'efficacité du collectif de travail. La présence d'au moins l'un des FOPs dégrade les phases des actions et en conséquence impacte l'efficacité du personnel. Ce modèle permet d'identifier des règles sémantiques sur la présence de FOPs et la dégradation des phases des actions de maintenance ainsi que l'inefficacité du collectif de travail.

En synthèse de ces différentes représentations du SM (fonctionnelle, dysfonctionnelle...) nous pouvons mettre en évidence différentes règles sémantiques à partir desquelles seront construits nos motifs :

- Une déviation des « flux entrants » de la fonction « maintenir l'équipement » produira des déviations de l'attribut « disponibilité » du flux sortant « DF équipement maintenu ». En ce sens :
 - La déviation « moins de disponibilité » des flux entrants PF « outils, pièces de rechanges, matériels consommables et personnel » conduit à l'augmentation de l'attribut « durée de l'action de maintenance » et en conséquence une diminution de l'attribut « disponibilité » du flux sortant « DF équipement maintenu » (déviation de la disponibilité par rapport à la valeur attendue).
 - La déviation « inefficacité » du flux entrant « PF personnel » (collectif de travail) amène à une diminution de l'attribut « disponibilité » du flux sortant « DF équipement maintenu » (déviation de la disponibilité par rapport à la valeur attendue).

- Un environnement « sévère » (dévié par rapport aux conditions nominales) diminue l'attribut « disponibilité » du flux sortant « DF équipement maintenu » (déviations de la disponibilité par rapport à la valeur attendue).
- La déviation des paramètres du flux entrant « VF Plan de maintenance » (i.e. périodicité des actions systématiques) conduit à la diminution de l'attribut « disponibilité » du flux sortant « DF équipement maintenu » ainsi qu'à la déviation d'autres performances du SM et du SM (par rapport à la valeur attendue).
- La présence de FOPs conduit à la déviation « inefficacité » du flux entrant « PF personnel » (collectif du travail).
- La « fiabilité du système d'observation » modifie une partie des actions conditionnelles/prévisionnelles prévues dans le plan de maintenance. Dans ce sens, la déviation « non-détection » de l'attribut « fiabilité du système d'observation » conduit normalement à une défaillance (maintenance corrective), et la déviation « fausse alarme » conduit à une action préventive sur un composant en bon état.

L'ensemble des différents points de vue modélisés précédemment sur le SP et le SM, sont complémentaires et permettent de représenter sur un même système les différents aspects qui sont à considérer. De plus ces aspects « techniques » sont impactés par le contexte organisationnel-humain de l'entreprise. Pour identifier des relations de dépendance entre les variables décisionnelles pour l'évaluation des stratégies de maintenance, comme l'impact d'une défaillance d'un composant sur la réalisation d'une fonction ainsi que sur la réalisation de la fonction du SP, il est nécessaire d'enchaîner les différents modèles (points de vue) en un tout cohérent. Ces relations sont utiles pour créer un modèle support à l'évaluation des stratégies de maintenance et à la quantification des performances.

2.2.4. L'interopération vs. l'intégration des connaissances des différents points de vue d'un même système

Les connaissances formalisées dans les différents modèles métiers contiennent différents types d'informations, certaines de nature qualitative et d'autres de nature quantitative. Pour estimer les performances issues des différents choix au niveau des stratégies de maintenance, il est nécessaire de disposer d'un modèle exécutable capable de simuler les différentes alternatives. Ce modèle peut s'exécuter et réaliser des simulations soit uniquement à partir de la connaissance qu'il renferme ou alors nécessairement en s'interfaçant avec des autres modèles métiers pour obtenir la connaissance dont il a besoin (lien statique-dynamique). Pour cela deux solutions existent: le premier cas requiert au préalable une « intégration » au sein d'un modèle unique de toutes les connaissances nécessaires et le deuxième cas repose sur un principe « d'interopération » entre modèles.

L'interopération entre les modèles demande une capacité de communication permettant de faire fonctionner chaque modèle avec l'autre en conservant chacun leur autonomie (Panneto et Molina, 2008). Ainsi chaque modèle conserve son formalisme mais chacun est capable d'échanger des informations d'un modèle vers l'autre (syntaxiquement, sémantiquement) (Figure 28). Ce choix

d'interopération de modèles est intéressant, toutefois il nécessite de résoudre des problématiques de correspondances sémantiques entre les modèles, de définition d'ontologies, etc.

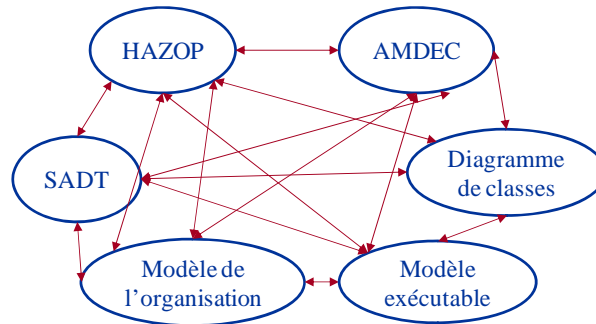


Figure 28. Interopération entre les modèles de connaissances métiers

Une autre voie est l'intégration qui propose le regroupement des connaissances diverses dans un seul modèle, créant de fortes dépendances entre les différentes connaissances (Chen et al., 2008). Cette alternative amène à d'autres problèmes de type pertes sémantiques... qui peuvent être combattues par l'application de règles.

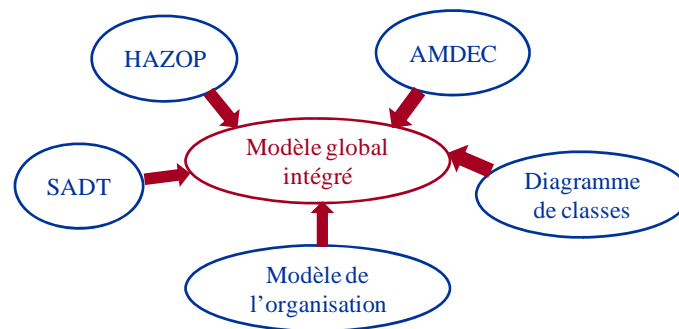


Figure 29. Intégration des modèles de connaissances métiers

Dans le cadre du projet SKOOB, l'un des objectifs était de disposer d'un modèle global exécutable sur un même formalisme capable de quantifier les performances du SP et du SM. Pour cette raison, nous avons choisi l'intégration, toutefois l'interopération entre modèles est une alternative qui peut être explorée dans des travaux futurs. L'intégration entre modèles répond bien à notre objectif puisqu'elle permet de rassembler les différents modèles de connaissances au sein d'un seul modèle qui contient l'ensemble des connaissances formalisées et qui peut être quantifiable.

L'intégration entre les modèles est basée sur l'intersection des objets en commun entre les modèles, sous l'hypothèse que les modèles possèdent la même sémantique. Pour cela il est nécessaire d'identifier les « objets partagés » entre les différents modèles permettant d'établir des relations entre les différents points de vue. Dans les modèles spécifiés précédemment, les objets en commun sont :

- La « Fonction » commun entre le SADT et l'AMDEC.
- Le « Flux » commun entre le SADT et le diagramme de classe, mais dans le diagramme de classe les attributs du flux sont spécifiés.

- Les « Attributs de flux » communs entre l'analyse HAZOP et le diagramme de classe.
- L'attribut « efficacité du personnel » est représenté dans le diagramme de classe comme l'attribut de l'objet « personnel » et il est commun au point de vue organisationnel-humain.

2.2.5. L'intégration des connaissances entre le SP et le SM

Une fois que les concepts communs sont identifiés et que l'intégration des différents modèles d'un même système est possible, il est nécessaire de relier les modèles associés au SP avec ceux du SM afin d'évaluer l'impact des performances du SM sur les performances du SP.

Pour cela nous faisons l'hypothèse qu'il existe des correspondances sémantiques entre les objets communs aux deux systèmes. Le concept qui fait le lien entre les deux systèmes est le « composant », qui est entretenu par le SM et qui est utilisé comme support d'une fonction du SP (Figure 30). En effet, le SM reçoit du SP un composant dégradé ou défaillant (flux d'entrée DF au SP) et le rend au SP comme un composant maintenu et capable de remplir la fonction assignée (flux de sortie DF au SP et flux d'entrée PF au SP). En ce sens, cette représentation permet d'établir la règle sémantique suivante: la déviation du flux sortant de la fonction « maintenir l'équipement » (« DF équipement maintenu ») produit une déviation du « flux sortant DF » de la fonction « transformer le flux principal entrant en flux sortant » du SP.

De façon similaire, la Figure 31 montre l'interaction entre le SP et le SM en précisant les attributs de flux ainsi que certaines variables non-explicitées dans le point de vue fonctionnel (i.e. l'environnement influence les performances d'un composant).

Cette règle de dépendance SM et SP est la dernière règle à formaliser issue de l'ensemble des représentations multi points de vue du SM et du SP.

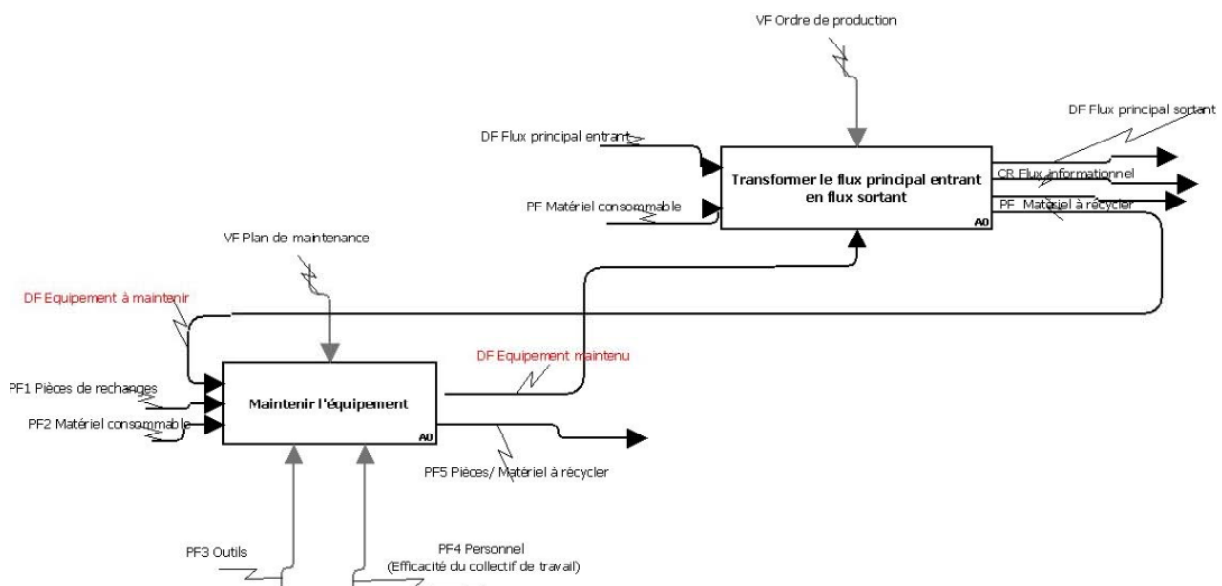


Figure 30. Lien fonctionnel d'une fonction principale du SP en relation avec le SM

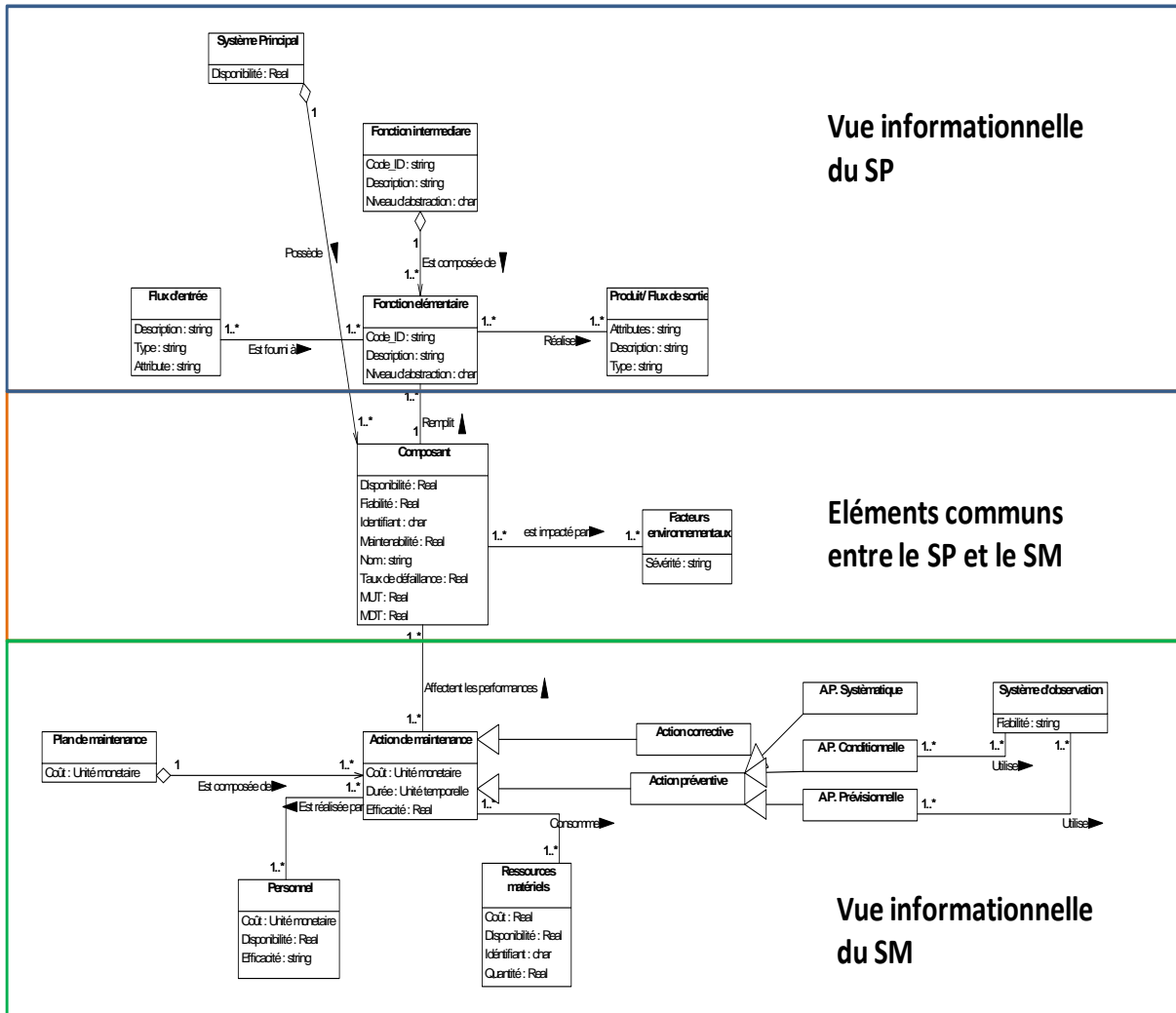


Figure 31. Vue informationnelle de la fonction principale du SP et du SM

2.3. Conclusion

Ce chapitre traite de la complexité des évaluations de stratégies de maintenance vis-à-vis des interactions entre le SP et le SM. Pour traiter cette complexité, l'ingénierie système propose la représentation de « parties partielles du système ». Nous considérons ainsi pour le SP et le SM une vue fonctionnelle, une vue informationnelle, une vue dysfonctionnelle et une vue organisationnelle-humaine.

Ces vues sont construites sur des outils adaptés (i.e. SADT) en appliquant des principes de modélisation sémantique comme ceux proposés dans les travaux de (Mayer, 1995) pour aboutir à des modèles métiers plus à même de faciliter la représentation SP, SM et SP/SM. Ces principes nous permettent de fonder les interactions, sous la forme de règles, entre les différentes vues à travers par exemple la notion générale de flux, de propriétés... ou des aspects plus spécifiques de composant.

Dans l'objectif de disposer au final d'un modèle exécutable pour réaliser les évaluations nous avons retenu un principe d'intégration (plutôt qu'interopération) entre les connaissances

contenues dans chacune de vues (chacun des modèles métiers) qui doit aboutir à la construction d'un modèle global unifié et exécutable.

Pour faciliter la construction de ce modèle, nous proposons dans le chapitre suivant la création de motifs génériques, modulables et exécutables formalisés à partir des règles sémantiques identifiées dans les modèles métiers issus de ce chapitre, de façon à conserver des relations de dépendances entre les connaissances. La création de ces motifs doit permettre la réutilisation de connaissances génériques d'un système afin de faciliter et guider la construction d'un modèle spécifique par instanciation (Figure 18 - Point B).

Chapitre 3

Motifs génériques de modélisation à base du langage probabiliste relationnel

3.1. Introduction

Le chapitre 2 a permis de fonder, sous la forme de règles sémantiques, des relations de dépendances au sein des éléments caractéristiques du SP et du SM ainsi que des interactions entre ces deux systèmes.

Ainsi afin de disposer, pour l'évaluation des stratégies de maintenance, d'un modèle global exécutable et pertinent en termes de sa construction à partir des connaissances du SP, du SM et de l'interaction SP/SM, ce chapitre 3 porte sur la création de motifs génériques formalisant les règles sémantiques (Figure 18 - Point B). Par exemple, nous détaillons dans ce chapitre les motifs de modélisation représentatifs d'un plan de maintenance, du support du système logistique pour mettre en œuvre le plan de maintenance, de l'efficacité du personnel, etc. ainsi que de l'impact des variables décisionnelles sur des indicateurs de performance clés (KPI) tels que les coûts et la qualité.

Ensuite nous abordons comment le modèle global est développé à partir de l'assemblage de ces motifs aussi bien en considérant un même niveau d'abstraction que des niveaux d'abstraction différents (i.e. niveau système, sous-système, composant). L'avantage de ce type de structure consiste en la possibilité d'utiliser certains modules (motifs génériques) selon l'application spécifique considérée, les besoins du modélisateur et la connaissance disponible. Cette modularité permet également de changer un motif sans modifier le reste du modèle.

La technique de modélisation retenue pour les motifs, conformément aux justifications de (Langseth et Portinale, 2007) (Weber et al., 2010) et (Pfeffer et Koller, 1999) est les modèles relationnels probabilistes (PRM). Le PRM est une extension des réseaux bayésiens qui permet d'intégrer des connaissances hétérogènes (quantitative et qualitative) au sein d'un même modèle. Ce PRM repose sur un langage de description orienté objet (« nommé Skool ») particulièrement adapté au traitement des modèles de grande taille. Ce langage a été développé au sein du projet SKOOB et auquel nous avons contribué pour garantir que son pouvoir expressif permet de supporter toute modélisation nécessaire à l'évaluation des stratégies de maintenance.

3.2. Vers des motifs génériques et exécutables

3.2.1. Outils classiques en sûreté de fonctionnement

Pour supporter la création de ces motifs et leur assemblage dans un modèle global, il est nécessaire de disposer d'un outil de modélisation permettant de répondre aux besoins sous jacents. Ces besoins de modélisation correspondent aux spécificités issues des règles sémantiques liées

aux connaissances du SP, du SM, des interactions entre ces deux systèmes ainsi qu'à leur assemblage dans un modèle unique. Ces besoins de modélisation peuvent se résumer en :

- Capacité de traiter des modèles de grande taille due à la croissance de la complexité des systèmes. Comme observé dans cette phase, un système est composé d'une grande quantité de variables qui possèdent des relations de dépendances entre elles.
- Représentation des attributs d'objets ainsi que ses différentes modalités. C'est pourquoi la représentation de variables non booléennes (multi-états) avec dépendances est requise.
- Intégration de connaissances variées : fonctionnelle, dysfonctionnelle, technique, humaine et organisationnelle.
- Nécessité de considérer différents niveaux d'abstraction.
- Calculs de probabilités exactes afin de tenir compte des événements très peu probables mais ayant des conséquences graves sur les performances globales du SP.

L'outil choisi doit donc supporter les pré-requis énoncés précédemment et permettre, par simulation, une évaluation et quantification des performances.

En ce sens, nous présentons une comparaison succincte (Tableau 5) d'outils d'analyse quantitative en sûreté de fonctionnement (SdF) en considérant les capacités de modélisation vis-à-vis des besoins exprimés. Parmi les outils classiques en SdF et en lien avec la recherche bibliographique réalisée, les plus adaptés à notre contexte semblent être les chaînes de Markov (CM), les Réseaux de Pétri stochastiques (RPS), les arbres de défaillances (AD) et les Réseaux Bayésiens (RB). Les croix sur le tableau montrent les capacités de modélisation de chaque outil en regard des critères identifiés précédemment.

Besoins de modélisation	CM	RPS	AD	RB
Capacité à traiter des modèles de grande taille due à la croissance de la complexité des systèmes.		X	X	X
Représentation des variables non booléennes (multi-états) avec dépendances	X	X		X
L'intégration de connaissances variées : fonctionnelle, dysfonctionnelle, technique, humaine et organisationnelle.		X	X	X
Capacité de modéliser différents niveaux d'abstraction		X	X	X
Calcul de probabilités exactes	X		X	X

Tableau 5. Comparaison d'outils sur la base des caractéristiques à modéliser pour l'évaluation des stratégies de maintenance

De cette synthèse, quelques éléments majeurs sont à relever pour définir l'adéquation ou la non-adéquation de ces outils pour supporter notre besoin de modélisation :

- Les CM permettent de représenter différents types de connaissances techniques mais leur inconvénient majeur vis-à-vis des systèmes réels, est leur limitation à modéliser des modèles de grandes tailles à cause de l'explosion combinatoire des états. Cette limite restreint l'utilisation de cette méthode pour des cas réels industriels (i.e. industrie nucléaire, agroalimentaire, etc.) composés de plusieurs composants et intégrant de multiples variables (Nowakowski et Werbinka, 2009).
- Les RPS sont, quant à eux, un outil puissant de modélisation puisqu'ils permettent de représenter des connaissances variées en tenant en compte de différents niveaux d'abstraction pour des systèmes de grande taille. Mais leur comportement est obtenu par l'utilisation de simulation de Monte Carlo ou par d'autres méthodes de simulation. Ce fait limite la prise en compte des événements avec des fréquences d'occurrence faibles qui peuvent également, par exemple, engendrer des conséquences majeures au niveau de la sécurité. Cet inconvénient limite la quantification des risques (enjeu majeur dans le cadre du projet SKOOB) dans le milieu industriel.
- Les arbres de défaillances (AD) permettent de représenter des dépendances entre des événements ainsi que l'intégration de différents types de connaissances (technique, humain et organisationnel). De plus ils peuvent intégrer différents niveaux d'abstraction. Cette notion est supportée par la démarche de construction de type « top-down ». Les AD ne représentent que des variables booléennes. Toutefois, les variables décisionnelles dans un plan de maintenance demandent parfois la représentation de variables multi-états, par exemple, lors de la défaillance d'un composant, les conséquences sur le fonctionnement du système peuvent être multiples comme pas de, moins de, plus de « flux », etc. Ces aspects limitent l'utilisation des AD pour notre contexte d'étude (i.e. ils ne peuvent modéliser qu'un seul événement redouté).

Compte tenu des limites soulignées précédemment, nous avons choisi la méthode de modélisation probabiliste à base de RB pour l'évaluation des stratégies de maintenance. Cet outil nous semble bien adapté aux besoins (Mahadevan et al., 2001), (Boudali et Dugan, 2005b), (Langseth et Portinale, 2007) (Langseth, 2008) tout en étant utilisé dans le monde industriel (Projet SKOOB, 2008). Cet outil de modélisation n'est pas la solution à tous les problèmes mais il semble être performant dans les études des systèmes complexes (Weber et al., 2011) grâce à sa capacité à calculer la probabilité exacte d'occurrence d'un événement, à représenter différents types de connaissances, à la représentation des variables multi-états et à sa capacité d'établir différents types de dépendances à travers des relations de causalité entre variables. De plus les RB permettent d'estimer d'autres performances que les performances probabilistes, par exemple, des performances économiques à travers l'intégration des nœuds d'utilité.

Cependant pour tenir compte des spécificités des systèmes traités dans notre travail et pour être cohérent avec les choix faits dans SKOOB, nous nous sommes orientés vers une déclinaison des RB que sont les PRM.

3.2.2. Les Réseaux Bayésiens

Les RB semblent être une solution adaptée pour la modélisation des systèmes complexes. Les RB factorisent les distributions jointes des variables basées sur des probabilités conditionnelles (Jensen, 1996) et (Pearl *et al.* 1988).

Les RB sont des graphes orientés sans circuit pour lesquels les nœuds représentent les variables d'un système et les arcs symbolisent les dépendances ou les relations cause-effet entre variables. Un RB est défini comme un ensemble de nœuds et un ensemble d'arcs dirigés. Une probabilité est associée à chaque état d'un nœud. Cette probabilité est définie, a priori pour un nœud racine et calculé par inférence pour les autres nœuds.

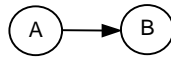


Figure 32. Exemple basique de relation entre variables en RB

Le calcul est basé sur les probabilités d'états de parents et dans une table de probabilité conditionnelle (TPC). Par exemple, dans la Figure 32, il y a deux nœuds : A et B, avec deux états (S_{*1} et S_{*2}) chacun. Les probabilités a priori du nœud A sont définies dans le Tableau 6.

A	S_{A1}	$P(A=S_{A1})$
	S_{A2}	$P(A=S_{A2})$

Tableau 6. Probabilités à priori du nœud A

Une TPC est associée au nœud B. La TPC est définie par la probabilité conditionnelle $P(B|A)$ liée à B avec comme parent A, pour définir les distributions des probabilités sur les états de B sachant les états de A. Le Tableau 7 montre la TPC définie par la probabilité de chaque état de B sachant l'état de A.

A		S_{A1}	S_{A2}
B	S_{B1}	$P(B=S_{B1} A=S_{A1})$	$P(B=S_{B1} A=S_{A2})$
	S_{B2}	$P(B=S_{B2} A=S_{A1})$	$P(B=S_{B2} A=S_{A2})$

Tableau 7. TPC du nœud B sachant les états de A

Alors, l'inférence des RB calcule la distribution marginale $P(B=S_{B1})$:

$$P(B = S_{B1}) = P(B = S_{B1}|A = S_{A1}).P(A = S_{A1}) + P(B = S_{B1}|A = S_{A2}).P(A = S_{A2}) \quad (6)$$

Le théorème de Bayes est le cœur de ce mécanisme permettant de mettre à jour un ensemble de probabilités d'événements selon les faits observés et la structure du réseau. La valeur ajoutée est liée aux calculs des probabilités attachées à l'état d'un nœud sachant l'état d'une ou plusieurs variables.

Les RB sont un outil puissant de modélisation des systèmes complexes. En effet, pour l'estimation de la fiabilité d'un composant, les RB permettent de fusionner des connaissances de diverses

natures dans un modèle : données provenant des retours d'expérience, jugement d'experts (exprimé sous formes de règles logiques, équations ou probabilités subjectives) (Celeux *et al.*, 2006), le comportement du système étudié (analyse fonctionnelle, dysfonctionnelle et organisationnelle-humaine) et des observations. De plus, le mécanisme d'inférence des RB permet la propagation ainsi que le diagnostic par exemple pour détecter les causes de dysfonctionnement dans un système.

Par rapport à ce formalisme, notre originalité réside en l'utilisation d'un langage orienté objet appelé le « Modèle Relationnel Probabiliste » (PRM) qui possède les mêmes capacités que les RB. En effet, au-delà des capacités des RB, les PRM permettent de traiter des modèles de très grande taille (Gonzales et Wuillemin, 2011). Pour cela, de façon similaire aux Réseaux Bayésiens Orientés Objet (RBOO), ce formalisme intègre des concepts additionnels comme la notion de classes et d'objets (Weber et Jouffe, 2006). De plus, il est possible d'exploiter la capacité d'héritage des langages orientés objets par la création des relations multiples vers des (i.e. tableaux) de « n » objets par la définition d'une classe (Pfeffer *et al.*, 1999) (Torti et Wuillemin, 2009).

De cette façon, une extension des RBOO, les « PRM » ont été formalisés afin de faciliter la modélisation de systèmes réels de grande taille (Getoor *et al.*, 2007).

3.2.3. Les Modèles Relationnels Probabilistes (PRM)

Ces modèles sont construits à partir d'un langage permettant une modélisation « structurée » à travers la notion d'objet et de classe d'objet qui capture les propriétés en commun d'un ensemble similaire d'objets ainsi que l'héritage d'attributs et des comportements de classes (Koller et Pfeffer, 1998), (Pfeffer *et al.*, 1999). Cette approche permet donc l'élaboration de modèles à partir de structures élémentaires répétées. Grâce à cette flexibilité, la construction d'un modèle avec différents niveaux d'abstraction est possible, à partir d'analyses fonctionnelles comme SADT. En effet, les premiers travaux sur la formalisation de modèle structuré à partir de SADT pour la modélisation de processus industriels par RBOO sont proposés par (Weber *et al.*, 2001), (Weber *et al.*, 2002), (Weber et Suhner, 2003). Les capacités des PRM permettent de capitaliser la connaissance par la création des classes génériques qui doivent être instanciées sur un système en particulier (Medina-Oliva *et al.*, 2009b).

Un autre avantage des PRM est la propriété d'agrégation d'un ensemble d'objets à travers des « quantificateurs » facilitant l'écriture des fonctions logiques et simplifiant la lourde tâche de paramétrage du réseau. Les PRM permettent de formaliser différents types d'incertitude qui ne peuvent pas être représentés dans les RB traditionnels ni dans les RBOO : l'incertitude sur l'ensemble des entités présentes dans un modèle et l'incertitude sur les relations entre ces entités (Koller et Pfeffer, 1998).

Les algorithmes d'inférence dans le PRM facilitent le calcul des modèles de grande taille et des systèmes complexes. L'utilisation de la notion de classe permet d'établir des « motifs probabilistes ou des fragments de réseau » à travers la définition d'une famille d'objets partageant des propriétés communes : graphe, attributs, références et TPC. Au niveau de l'inférence cela permet le calcul des fragments de réseau bayésiens en une seule fois pour être réutilisé pour chaque instance du système (Torti et Wuillemin, 2010).

De plus l'inférence sur le PRM est basée sur les principes suivants :

- a. L'exploitation de la structure de premier ordre pour l'identification des symétries et des motifs récurrents permettant d'éviter les calculs répétitifs.
- b. L'exploitation de la « micro-structure » probabiliste pour éviter la croissance exponentielle des tableaux de probabilités conditionnelles impliquant un grand nombre de variables.
- c. L'utilisation de séparateurs plus compacts que ceux traditionnellement utilisés pour propager l'information probabiliste entre les différentes parties du modèle.
- d. L'exploitation de la requête : calculs circonscrits à la seule partie du modèle nécessaire pour répondre à la requête.

L'identification des symétries et des motifs récurrents est réalisée par un algorithme (appelé Structured Variable Elimination- SVE) qui exploite l'information structurelle d'un PRM pour empêcher la répétition de certains calculs à travers l'élimination des nœuds (internes) au niveau des classes (Torti et Wuillemin, 2010).

L'exploitation de la « micro-structure » probabiliste est possible en ajoutant des « agrégateurs ou quantificateurs » lesquels facilitent la quantification des TPC à travers la définition d'une fonction quelconque, par exemple une fonction de logique combinatoire.

Il est aussi possible de réaliser des requêtes telles que l'inférence soit réalisée dans une partie compilée spécifique du modèle. En effet, il n'est pas nécessaire de calculer le modèle en entier (décrit dans un langage) (Pfeffer et al., 1999), (Getoor et al., 2007). Pour cela, il faut diviser le réseau en fragments de réseau permettant des calculs dans un temps raisonnable. De cette façon l'inférence peut être limitée à des sous-graphes considérés comme pertinents du réseau global. Cette pertinence est donnée à travers des indépendances conditionnelles définies par exemple par des propriétés de d-séparation. Nous précisons que la d-séparation définit l'indépendance de deux variables X et Y lorsqu'elles sont connectées à travers une troisième variable intermédiaire Z (soit en série, en divergence ou en convergence) (voir Figure 33) et l'état de la variable intermédiaire Z est connu par des observations. Cela crée des indépendances conditionnelles (Jensen, 1996), (Léger, 2009), c'est-à-dire une fois que Z est connue l'état de X est indépendant de Y et vice-versa.

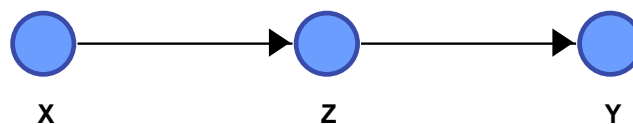


Figure 33. Connexion en série

Alors, une fois qu'un nœud est considéré comme indépendant de la variable cible, il n'est plus utilisé pour les calculs d'inférence. En conséquence, lors de la requête, un ensemble minimal de variables aléatoires doit être pris en compte pour le calcul d'une probabilité marginale. De cette façon il est possible d'augmenter l'efficacité des algorithmes d'inférence en exploitant les

caractéristiques des modèles orientés objets (pré-compilation des fragments de réseaux, focalisation sur la partie utile (pertinente)) et en tenant compte des ressources disponibles.

Ces caractéristiques facilitent donc la réutilisation des modèles (par la définition de classes génériques par exemple) ainsi que la création de modèles de systèmes particulièrement complexes et de grande taille adaptés aux besoins industriels en intégrant diverses types de connaissances (Projet SKOOB, 2011).

Un bilan comparatif entre les RB classiques et les PRM est donné (Tableau 8) pour montrer l'apport de ce nouvel outil de modélisation.

Critère	Réseaux Bayésien « classiques »	PRM (fonctionnalités du langage Skool)
Puissance de modélisation	-	+
	Modèle limité sur le nombre des variables à traiter.	Possibilité de traiter des modèles de grande taille grâce aux nouveaux algorithmes d'inférence. L'inférence devient faisable pour des modèles probabilistes hors d'atteinte des techniques à base de réseaux bayésiens « classiques »
	+	+
	Permet l'intégration de connaissances de types divers.	
	+	+
Le modèle autorise des représentations de variables non booléennes.		
Difficulté d'élaboration du modèle	-	+
	Impossibilité de capitaliser des connaissances et de réutiliser des modèles.	Le PRM facilite la réutilisation d'éléments génériques stockés en bibliothèque à travers la création des classes génériques.
Paramétrage du modèle	-	+
	Paramétrage des TPC lourd.	Les PRM intègrent des quantificateurs, ce qui facilite la phase de quantification.
Exploitation du modèle	+	+
	Permet le calcul exact de probabilités d'occurrence d'événements de façon prévisionnelle, et aussi en diagnostic.	

Tableau 8. Etude comparative des Réseaux Bayésiens classiques et les PRM

Pour représenter et supporter les fonctionnalités des PRM, le langage Skool a été créé par le projet SKOOB. Ce langage permet donc une représentation compacte des informations pour la création

de modèles complexes de grandes tailles. Dans le cadre de ce projet, nous avons participé à la création de ce nouveau langage de modélisation et plus précisément à l'expression de besoins de modélisation pour la représentation de motifs génériques nécessaires à l'évaluation de stratégies de maintenance. Puis, nous avons développé des tests pour évaluer son pouvoir expressif en fonction des besoins de nos modélisations. Cela a permis d'intégrer les notions de PRM (transcrites en langage Skool) au sein d'un module lequel lors de la compilation du code en langage Skool, permet d'obtenir le modèle sur un format en réseau bayésien. De cette manière ce nouveau module est interconnectable avec le logiciel Bayesianlab offrant ainsi une nouvelle fonctionnalité à l'outil.

3.2.4. Spécification du langage Skool

La syntaxe de Skool utilisée est inspirée de Java. Les caractéristiques du langage Skool sont basées sur les principes du PRM comme : l'utilisation des classes, déclaration d'attributs et références des classes, insertion des TPC, utilisation de la propriété de spécialisation et l'exploitation des quantificateurs. Certaines notions de ce langage sont développées ci-après.

a. Déclaration d'une classe

Une classe permet de capturer les attributs et comportements d'un ensemble d'objets afin de permettre la création d'objets à travers une modélisation de structures répétées. La syntaxe de déclaration d'une classe est :

```
class A {
// Corps de la classe
}
```

Le corps d'une classe contient la liste de dépendances composée de déclarations d'attributs et de références. Une référence est un renvoi vers un objet dont le type est une autre classe.

b. Déclaration d'attributs au sein d'une classe

Un attribut définit les propriétés d'une classe. Il possède les caractéristiques suivantes :

- un type;
- un nom;
- une liste, éventuellement vide, d'attributs dont il dépend (ses parents);
- une table de probabilité conditionnelle (TPC).

La syntaxe de déclaration est:

```
nom_du_type nom_de_l_attribut [dependson liste_des_dependances] { declaration_de_la_cpt };
```

La partie entre [] est optionnelle (dans le cas où l'attribut n'a pas de parent).

c. Déclaration d'une TPC

Une façon pour déclarer une TPC consiste à déclarer intégralement la table. Dans ce cas l'ordre de déclaration est primordial. La première valeur correspond à la probabilité $P(A[1]|P_1[1], P_2[1], \dots, P_N[1])$, la seconde valeur à la probabilité $P(A[1]|P_1[1], P_2[1], \dots, P_N[2])$, et ainsi de

suite. Les valeurs $A[i]$ correspondent au label i de l'attribut A , $P_j[i]$ correspond au label i du j -ième attribut dans la liste de dépendance de A .

```
nom_du_type nom_de_l_attribut [dependson liste_des_dependances] {
// | false | true |
// | OK | NOK | OK | NOK |
/* OK */ [ 0.0, 0.0, 1.0, 0.0,
/*NOK */ 1.0, 1.0, 0.0, 1.0 ]
};
```

Une TPC doit être normalisée : la somme de chaque colonne doit être égale à 1. Afin de faciliter la tâche de remplissage des TPC, le langage compte certaines fonctions d'agrégation.

d. Fonctions d'agrégations

Actuellement cinq fonctions d'agrégations sont autorisées dans Skool :

- min,
- max,
- exists,
- forall,
- mean.

Par exemple, les fonctions `exists` (correspondant à une fonction « OU » logique) et `forall` (correspondant à une fonction « ET » logique), prennent en compte deux paramètres: une liste de chaînes de références et une modalité. La valeur renvoyée est un booléen.

```
class A {
// Des déclarations
boolean un_exists = exists([chaîne_1, chaîne_2, ...], une_modalité);
// D'autres déclarations
}
```

e. Spécialisation

La spécialisation consiste à définir à partir d'une classe (la classe mère) un ensemble de sous classes (les classes filles) spécialisant les connaissances représentées dans la classe mère. L'héritage par spécialisation permet de définir des connaissances de manière top-down, c'est-à-dire d'un concept général vers des concepts spécifiques. La syntaxe pour déclarer une classe spécialisée est :

```
class class_fille extends class_mere {
// Déclaration de la classe fille
}
```

Lorsqu'une classe fille hérite d'une classe mère elle possède tous les attributs, TPC et références définies dans la classe mère (comme une copie).

f. Instanciation

L'instanciation consiste à créer une nouvelle instance d'une classe, c'est-à-dire : créer un objet particulier à partir d'une classe. La syntaxe est la suivante :

```
UneClasse un_nom;
```

Il est possible de déclarer un tableau d'instances en ajoutant $[n]$ comme suffixe au nom de la classe, où n est un entier non nul positif correspondant au nombre d'instances dans le tableau.

```
// Un tableau de trois instances
UneClasse[3] un_nom;
```

La création des classes permet la création des motifs ou modèles génériques facilement instanciables sur un modèle spécifique. Par exemple nous pouvons créer des motifs représentatifs d'un composant et de sa stratégie de maintenance et ensuite les instancier au cas de composants de types pompes, moteurs ou vannes soumis à des stratégies correctives ou conditionnelles, etc. Dans la suite nous allons montrer comment il est possible de construire des motifs génériques supportés par les PRM à partir des règles sémantiques définies dans le chapitre 2.

3.3. Unification et Intégration des connaissances dans un PRM

Le langage PRM doit nous permettre d'établir de classes génériques représentatives des variables décisionnelles sur les différents aspects du SM et du SP, nécessaires pour intégrer les caractéristiques multipoints de vues du SP et du SM.

Nous présentons donc les étapes nécessaires à la construction des motifs génériques à base de classe générique en PRM, c'est-à-dire la définition des variables utiles dans les motifs pour représenter les connaissances formalisées dans le chapitre 2 (les règles) ainsi que leurs dépendances et comment les différents motifs interagissent dans un même niveau d'abstraction mais aussi entre plusieurs niveaux d'abstraction. A la fin de cette présentation, nous expliquons comment intégrer d'autres KPI de type financier pour l'estimation de performances du SP et du SM.

3.3.1. Définition des Motifs

« Un motif décrit un problème avec une occurrence fréquente et décrit plus précisément le noyau de la solution de ce problème, de façon à pouvoir utiliser cette solution plusieurs fois sans le faire de la même façon deux fois » (Alexander et al., 1977). Pour notre cas, le problème est la création d'un modèle pour l'évaluation des stratégies de maintenance. Dans ce modèle les motifs peuvent représenter une modélisation modulaire des variables représentatives des choix en maintenance afin de quantifier l'impact des actions sur les performances globales du SP et du SM. Avec cette approche modulaire, des sous-modèles sont créés pour représenter les éléments et caractéristiques du SM et du SP.

Pour la construction des motifs nous utilisons les connaissances représentées dans les vues fonctionnelles, dysfonctionnelles et informationnelles afin d'identifier les variables et les dépendances entre elles (connaissances essentielles contenues dans les règles établies au chapitre 2).

Construction des motifs génériques pour évaluer les stratégies de maintenance

Pour modéliser les différents aspects du SP et du SM dans un modèle PRM, nous proposons de prendre en compte les connaissances décrites dans les différents points de vue métier (règles sémantiques) (Figure 18– A).

Ces règles sont traduites sous la forme d'un modèle probabiliste où les variables sont représentées par les nœuds et leurs relations de dépendance ou de causalité sont représentées par les arcs. Les

relations entre les variables sont spécifiées dans l'analyse informationnelle ou dans l'analyse fonctionnelle lorsqu'il y a des échanges de flux entre les fonctions.

La construction des motifs à base de PRM se déroule en différentes étapes illustrées par la Figure 34.

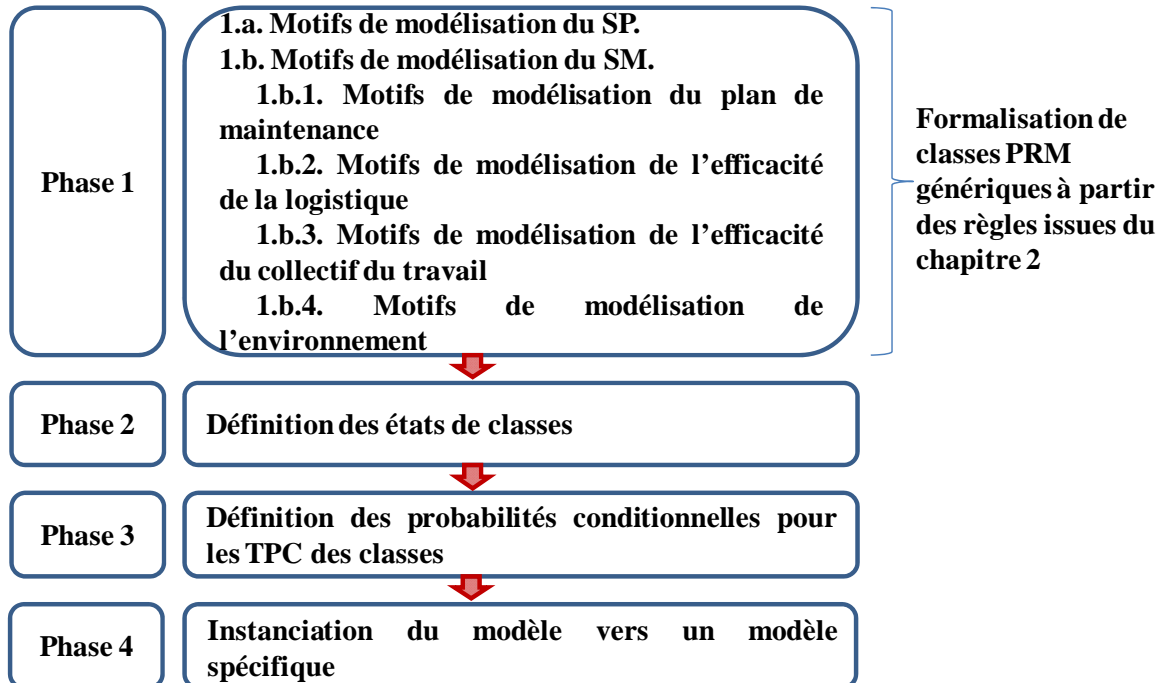


Figure 34. Phases de construction et d'instanciation de motifs à base de PRM

Chacune des phases peut se détailler de la façon suivante :

A. Phase 1 : Formalisation des classes PRM génériques

Par rapport aux règles sémantiques issues de l'analyse du SP et du SM, qui soulignent la dépendance de l'état du flux de sortie « DF » en fonction de l'état des flux entrants, il est nécessaire d'intégrer des classes PRM représentant des flux ou des attributs de flux d'entrée et de sortie dans chaque fonction. La formalisation de ces classes PRM doit définir les dépendances d'une classe avec d'autres classes.

1.a. Motifs de modélisation des fonctions du SP

Pour représenter la fonction générique « transformer le flux entrant en flux sortant » du SP, nous créons la classe « Flux » extraite de l'analyse fonctionnelle. Cette classe est une classe générique permettant de représenter les différents types des flux : DF, SF, PF et VF entrant d'une fonction (section 2.2.2.1). Par exemple, pour une fonction comme « transférer le flux d'un point A à un point B », nous utilisons la classe générale « Flux » capable de représenter tous les flux entrants à la fonction, comme par exemple le débit du flux (DF entrant), l'énergie électrique (PF), la consigne (VF), etc. (Medina-Oliva et al., 2010).

Dans le langage Skool, elle est définie comme:

```
class Flux{
  Typeetat etat{ [0.99,0.01] };
}
```

Cette classe est spécialisée en « classe de flux sortant » afin de représenter tous les flux sortants d'une fonction tels que les PF, le CR et le DF, comme montré Figure 35 :

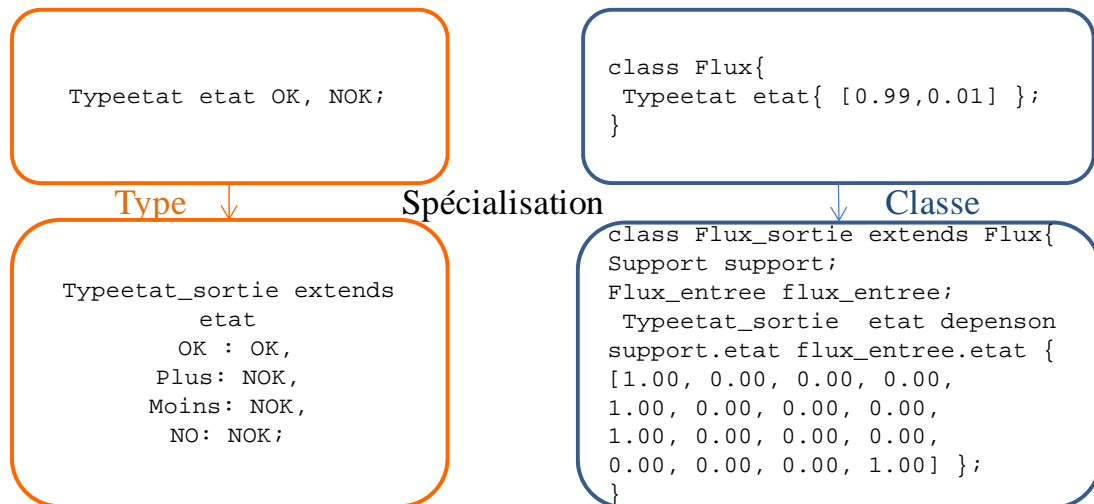
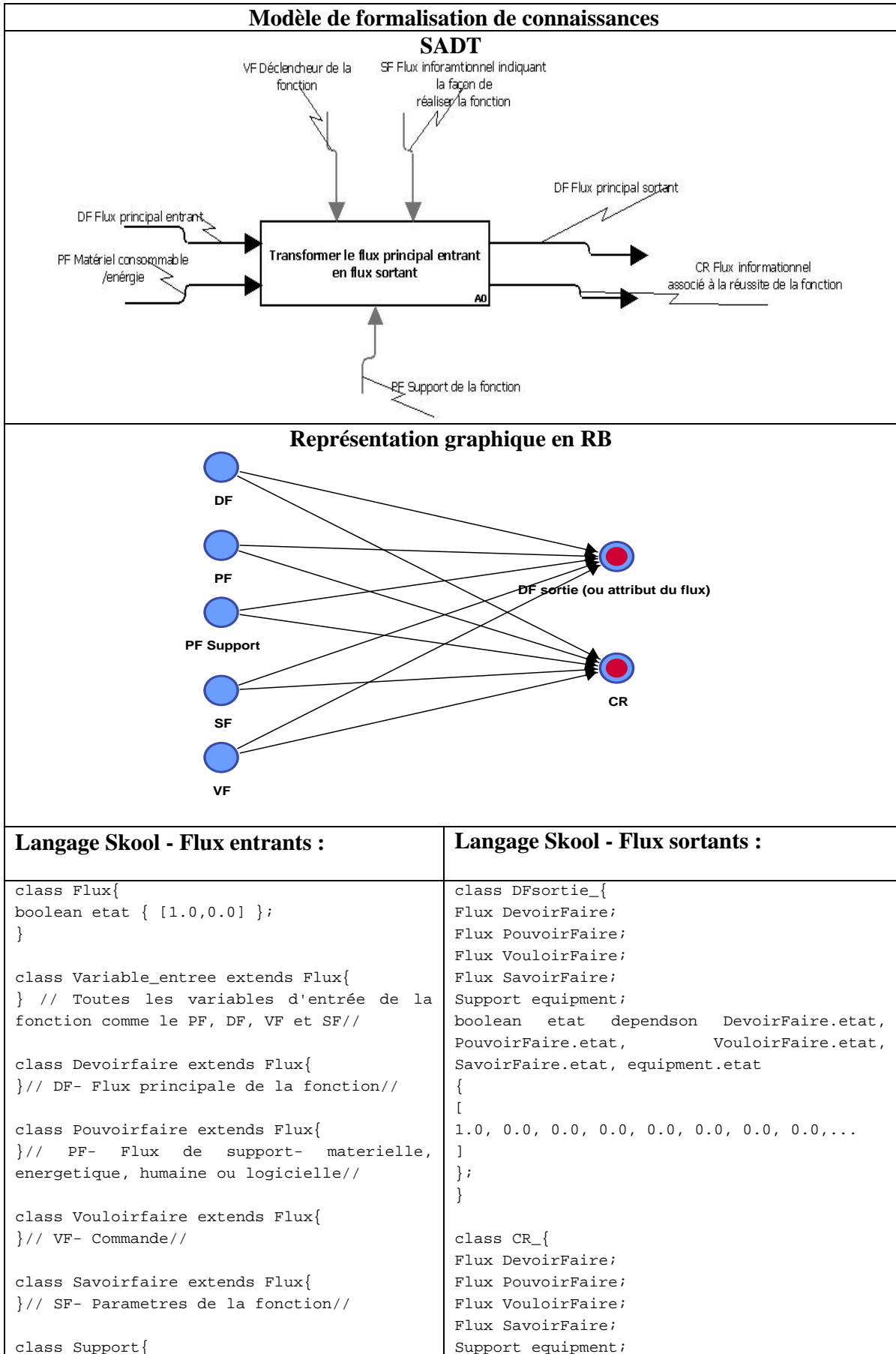


Figure 35. Spécialisation de classes dans le PRM

En utilisant la même sémantique que celle définie dans le modèle fonctionnel créé à partir du SADT, les flux sortants dépendent donc de l'état des flux entrant de la fonction (de tous les types PF, le CR et le DF) et de l'état du support de la fonction (section 2.2.2.1).

Pour représenter des attributs de flux d'entrée (énergie, information ou flux matériel) d'une fonction, il est possible d'avoir plusieurs instances de la classe « flux ». Pour définir un flux ou attribut du flux sortant, il est nécessaire de créer une instance pour chaque flux sortant.

La Figure 36 illustre le passage de SADT vers le langage Skool et la structure du réseau à partir de la fonction « transformer le flux entrant en flux sortant ». En se basant sur les relations de dépendances entre les flux entrants et sortants, les flux entrants sont représentés dans le PRM comme une classe racine ou parent générique appelé « flux » et les flux sortants sont considérés comme une classe qui dépend des flux entrants (classe fille des flux entrants).



<pre>boolean dispo { [0.9,0.1] }; } // PF-Equipment de support a la fonction//</pre>	<pre>boolean etat dependson DevoirFaire.etat, PouvoirFaire.etat, VouloirFaire.etat, SavoirFaire.etat, equipment.etat { [1.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, ...] }; }</pre>
--	---

Figure 36. Construction du motif générique du SP

De plus, il faut considérer que s'il y a deux composants qui supportent la même fonction (parallélisme), une seule fonction avec un seul support de la fonction est représentée dans le modèle SADT. La distribution de probabilité sur les états du support est calculée habituellement dans une analyse de sûreté à travers un AdF ou diagramme de fiabilité. Dans le langage Skool une fonction « OU logique » permet de représenter le parallélisme et des quantificateurs permettent de représenter les redondances k/n.

Ce motif doit être généré pour chaque fonction élémentaire du SP.

1.b. Motifs de modélisation du SM

Les motifs relatifs au SM sont construits en utilisant la même démarche de modélisation. Pour réaliser la fonction principale du SM « maintenir l'équipement » il est nécessaire d'avoir : un plan de maintenance, des ressources logistiques comme les outils, les pièces de rechanges, etc. ainsi que du personnel. Le résultat de cette fonction est alors l'équipement maintenu. Sur le flux sortant « équipement maintenu » nous nous intéressons à son attribut disponibilité (vue informationnelle). Les relations de dépendances exprimées dans la vue fonctionnelle et informationnelle sont reprises pour la construction du motif du SM à base de PRM. De cette façon nous avons créé trois classes qui quantifient la disponibilité du composant suite à l'entrée de chaque flux. En conséquence la disponibilité du composant dépend donc d'un plan de maintenance, de l'efficacité de la logistique et de l'efficacité du collectif du travail (Figure 26).

En cohérence avec notre démarche, (Mohaghegh, 2007) (Figure 37) montre d'une façon générique comment l'efficacité d'une action dépend de l'efficacité du personnel ainsi que de l'efficacité des ressources et des procédures.

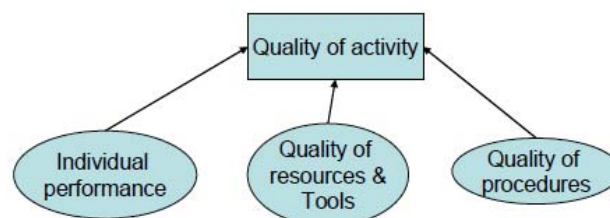


Figure 37. Causes racines de qualité d'une activité, (Mohaghegh, 2007)

De cette manière nous représentons les interactions entre les différents systèmes contributeurs du SM tels que le système de logistique et les ressources humaines.

Une fois identifiés les flux nécessaires (le plan de maintenance, l'efficacité de la logistique et l'efficacité du collectif du travail), nous utilisons les connaissances spécifiées dans la vue informationnelle.

1.b.1. Motifs de modélisation du plan de maintenance

Pour créer la structure du motif du plan de maintenance, nous nous basons surtout sur le diagramme de classe (Figure 27). Le plan de maintenance contient la gamme ou l'ensemble des actions à réaliser pour maintenir le composant. Tel que précisé dans le diagramme de classe, les actions de maintenance sont de nature préventive systématique, préventive conditionnelle, préventive prévisionnelle ou corrective. Cette typologie détermine les moments où les interventions de maintenance doivent être réalisées (Figure 38 - A).

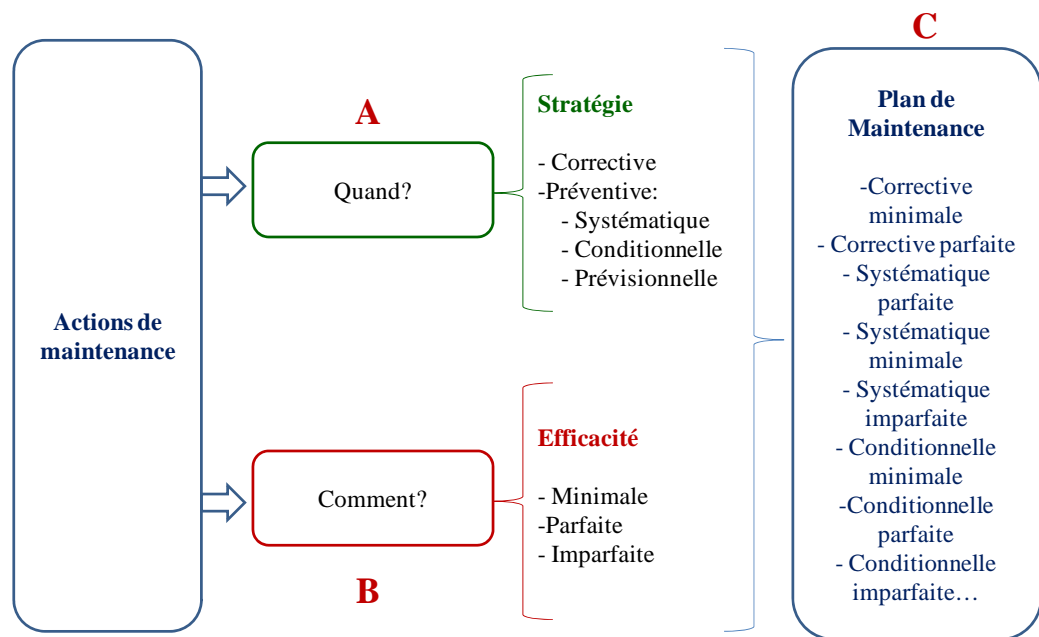


Figure 38. Caractéristiques d'actions de maintenance

De plus, les actions prévues dans le plan de maintenance ont une efficacité (attribut des actions de maintenance) de façon indépendante du type de maintenance. Cette efficacité représente le degré de restauration d'un composant grâce aux actions de maintenance et fait référence à l'efficacité prévue dans le plan de maintenance. L'efficacité est décomposée en trois catégories : minimale, parfaite et imparfaite (Figure 38- B).

En conséquence une variable appelée « Actions de Maintenance » est créée avec plusieurs modalités pour prendre en compte le type de l'action et l'efficacité de la maintenance : corrective minimale, corrective parfaite, systématique parfaite, systématique minimale, systématique imparfaite, conditionnelle parfaite, conditionnelle minimale, conditionnelle imparfaite. Ce nœud condense la totalité des actions à réaliser dans le plan de maintenance (Figure 38- C).

Ensuite, les actions conditionnelles et prévisionnelles ont besoin d'un système d'observation caractérisé par sa fiabilité. Ce dernier est intégré dans le motif à travers la variable « fiabilité du système d'observation ». Elle impacte sur les actions prévues dans le plan de maintenance, cet effet est observé à travers la variable « Actions de maintenance modifiées » (Figure 39).

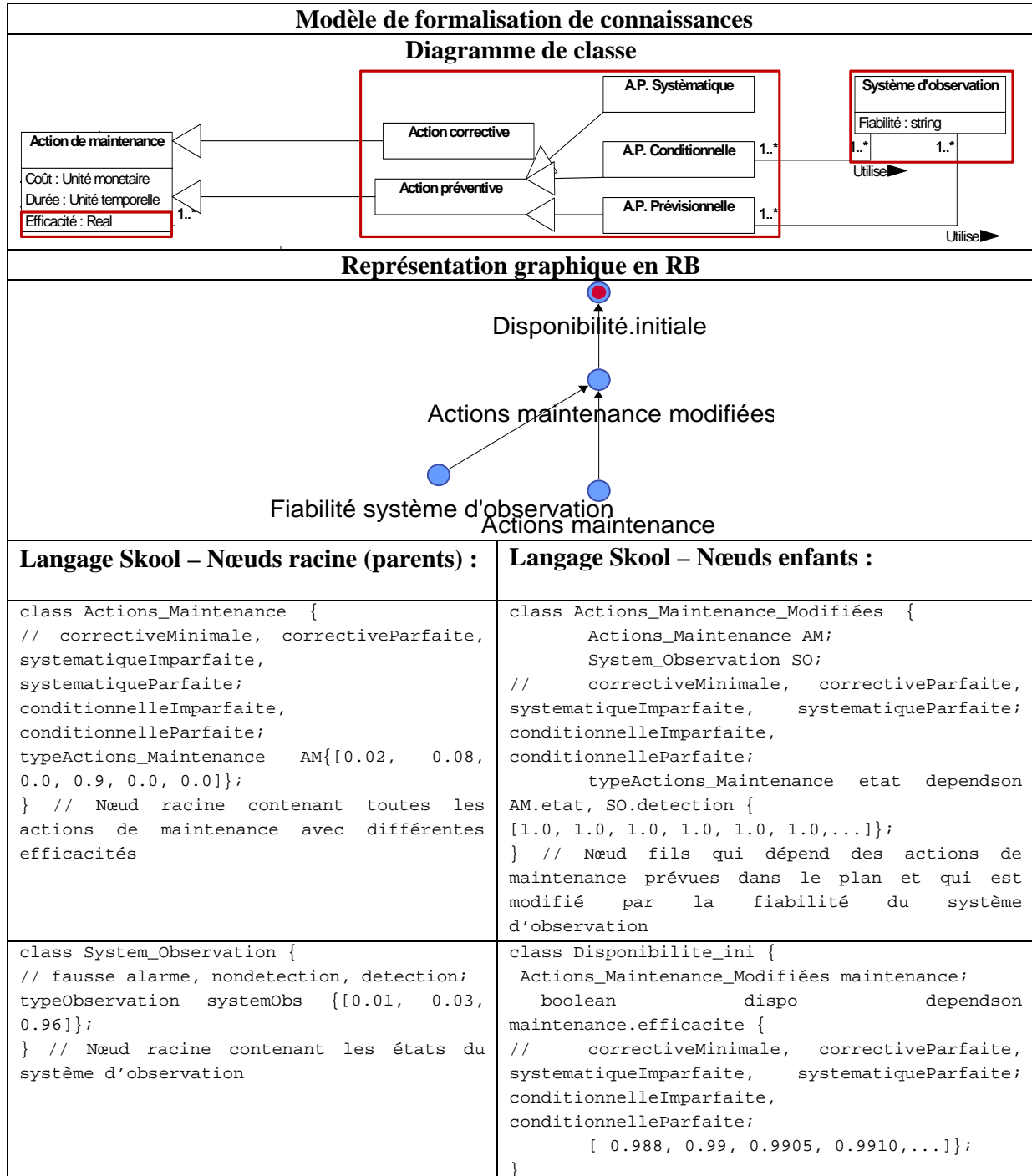


Figure 39. Construction du motif générique du « plan de maintenance »

1.b.2. Motifs de modélisation de l'efficacité de la logistique

Le motif « efficacité de la logistique » regroupe tous les matériels nécessaires pour réaliser l'action de maintenance comme les outils, le personnel et les pièces de rechanges. Pour cette raison, nous avons regroupé tous les éléments logistiques au sein d'une classe appelée « efficacité de la logistique » laquelle impacte la disponibilité du composant en fonction de la disponibilité des matériels (Figure 40).

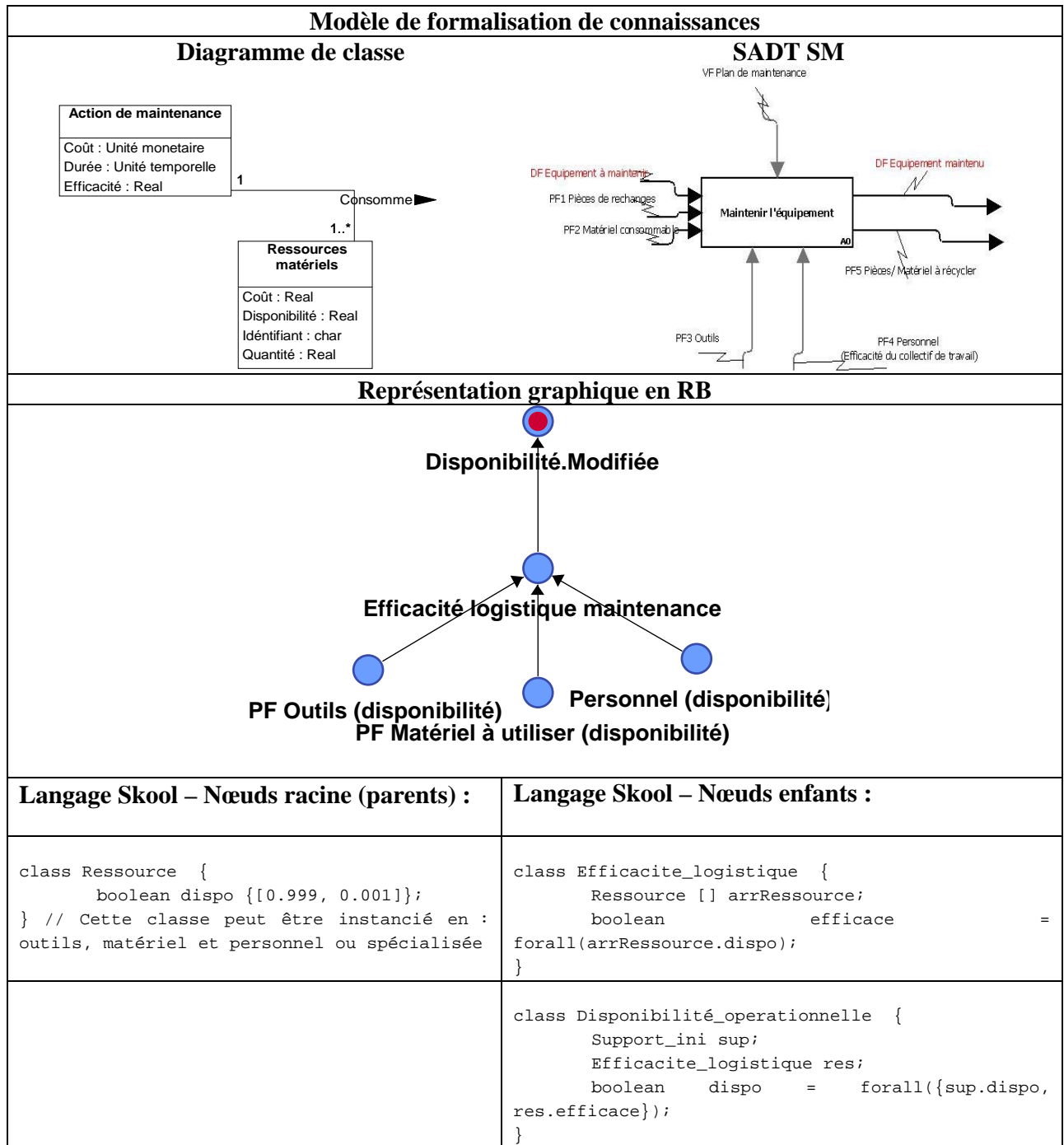
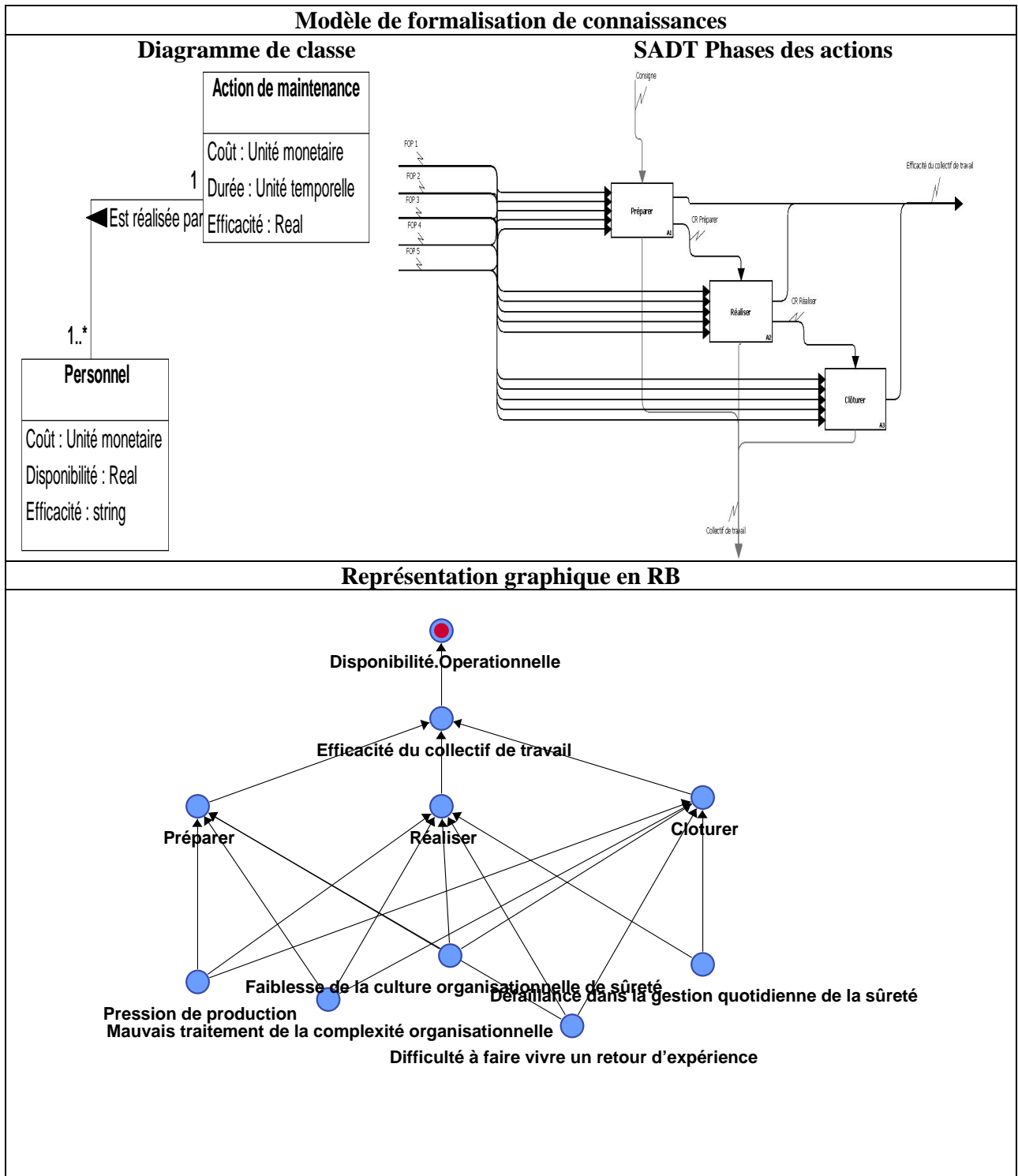


Figure 40. Construction du motif générique « efficacité de la logistique » du SM

1.b.3. Motifs de modélisation de l'efficacité du collectif du travail

Le motif « efficacité du collectif du travail » est aussi nécessaire pour réaliser les actions de maintenance. Pour construire ce motif ainsi que l'impact des facteurs organisationnels pathogènes (FOPs) sur l'efficacité du personnel, nous avons adapté l'approche développée par (Lèger, 2009) à notre problématique. Lorsque le personnel n'est pas efficace la disponibilité du composant est aussi impactée (Figure 41).



Langage Skool – Nœuds racine (parents) :	Langage Skool – Nœuds enfants :
<pre> class Pathogene { // [True, False] boolean FOP_pp {[0.01,0.99]}; // pression de production boolean FOP_mt {[0.01,0.99]}; // mauvais traitement de la complexite organisationnelle boolean FOP_rex {[0.01,0.99]}; // Difficulté à faire vivre un retour d'expérience boolean FOP_fco {[0.01,0.99]}; // faiblesse de la culture organisationnelle boolean FOP_gqs {[0.01,0.99]}; // défaillance de la gestion quotidienne de la complexite } /* Les facteurs pathogènes sont les mêmes pour chacune des actions et leur présence ou non est indépendante de l'action sur laquelle ils impactent */ </pre>	<pre> class Ietape_action { Pathogene patho; boolean degrade; } class Preparation extends Ietape_action { boolean degrade = noisyor({patho.FOP_pp, patho.FOP_mt, patho.FOP_rex, patho.FOP_fco, patho.FOP_gqs}, {0.05, 0.0, 0.01, 0.0, 0.01}, 0.001); } class Realisation extends Ietape_action { boolean degrade = noisyor({patho.FOP_pp, patho.FOP_mt, patho.FOP_rex, patho.FOP_fco, patho.FOP_gqs}, {0.1, 0.0, 0.01, 0.0, 0.01}, 0.001); } class Cloture extends Ietape_action { boolean degrade = noisyor({patho.FOP_pp, patho.FOP_mt, patho.FOP_rex, patho.FOP_fco, patho.FOP_gqs}, {0.05, 0.0, 0.01, 0.0, 0.01}, 0.001); } </pre>
	<pre> class Action { Ietape_action prepa; Ietape_action rea; Ietape_action clo; boolean non_efficace = noisyor({prepa.degrade, rea.degrade, clo.degrade}, {0.1, 0.3, 0.1}, 0.005); } </pre>
	<pre> class Support_operationnel_modif { Support_operationnel sup; Action perso; boolean dispo = forall({sup.dispo,perso.efficace}); } </pre>

Figure 41. Construction du motif générique « efficacité du collectif du travail » du SM

Les motifs « efficacité de la logistique » et « efficacité du collectif du travail » peuvent être instanciés une seule fois dans le modèle ou instanciés pour chaque composant ou famille de composants selon les besoins du modélisateur. S'ils sont instanciés une seule fois, la modélisation est plus générale avec l'avantage du gain du temps dans la modélisation mais avec l'inconvénient de la perte de précision à cause de l'agrégation de connaissances. Le résultat n'est plus sensible au composant ou famille de composants. Et contrairement, la particularisation des motifs demandent plus d'effort et de temps dans la modélisation mais l'incertitude sur le modèle est réduite (si les paramètres plus nombreux restent précis).

1.b.4. Motifs de modélisation de l'environnement

Un dernier motif externe à la maintenance est « l'environnement » du composant. Lorsque le composant est soumis à des environnements sévères, certains mécanismes de dégradation s'accroissent et son taux de défaillance augmente. Alors ce motif intègre l'impact de l'environnement sur la disponibilité du composant. Cette variable n'est pas visible dans la vue fonctionnelle du SM puisque c'est un facteur externe à la maintenance, mais nous l'avons intégré dans la vue informationnelle (Figure 42). De cette façon l'environnement impacte les performances du composant.

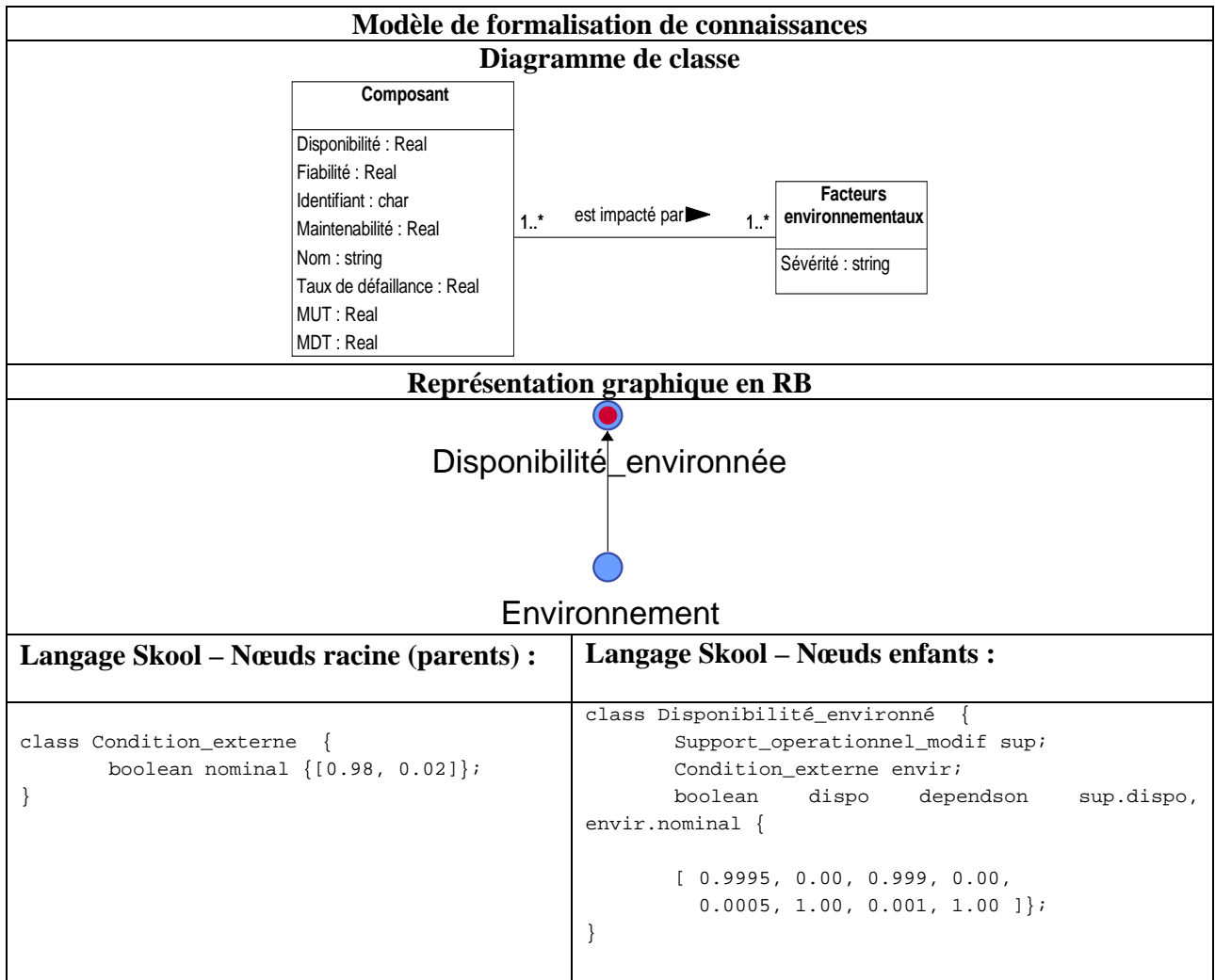


Figure 42. Construction du motif générique « l'environnement » du SM

L'ensemble des motifs présentés pour le SM doit être généré pour chaque composant du SP. De cette façon, il y a quatre nœuds qui quantifient la disponibilité du composant (Figure 43). Le premier est impacté par l'ensemble des actions prévues dans le plan de maintenance. Dans le deuxième, la disponibilité du composant est impactée par les moyens logistiques. Le troisième est impacté par les facteurs organisationnels et humains, et le dernier par les conditions d'exploitation auxquelles le composant est soumis.

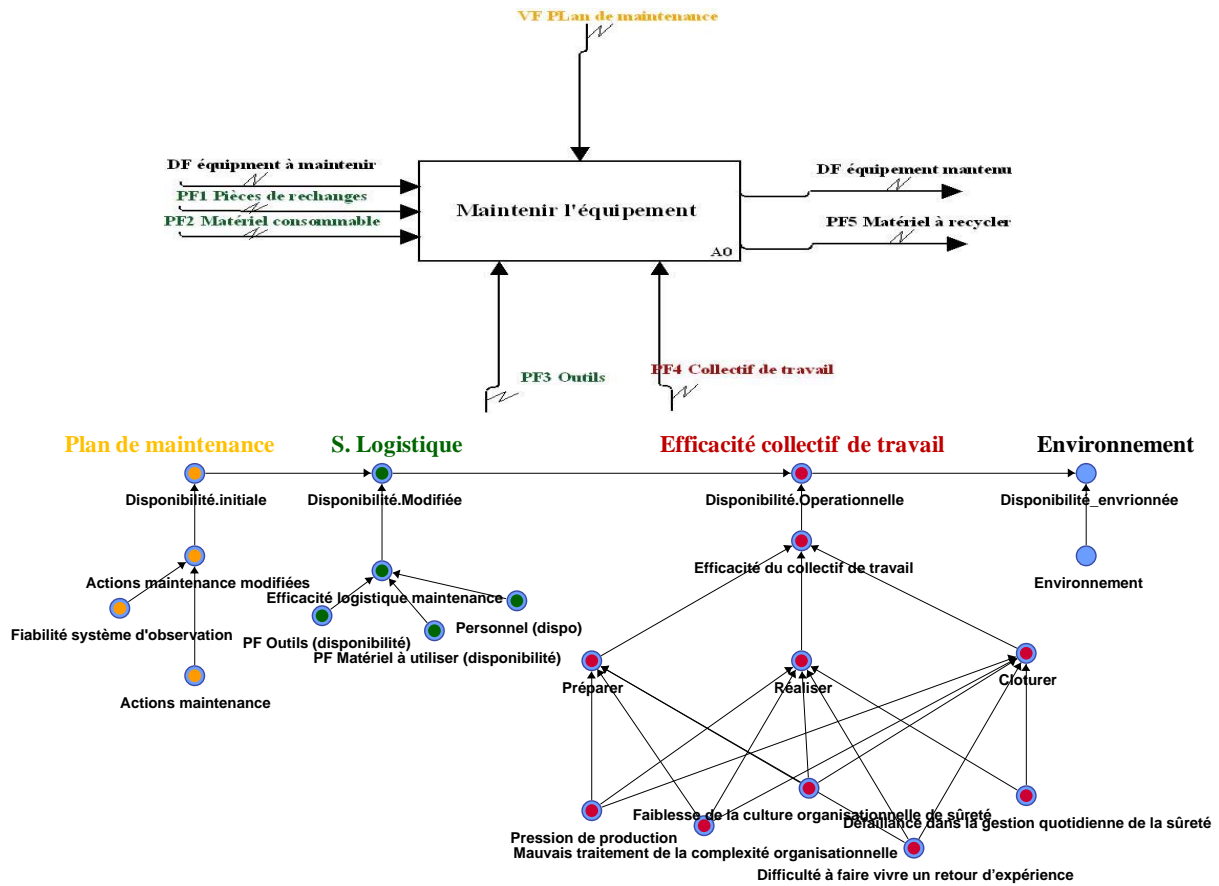


Figure 43. Construction des motifs génériques du SM

Ensuite les modalités de chaque classe sont spécifiées (Figure 34).

B. Phase 2 : Définition des états de classes

Les classes au sein du PRM (représentant un ensemble de variables) sont définies, en général, de manière discrète grâce à une partition de plusieurs états. Les états représentent l'ensemble de valeurs que peuvent prendre la classe, par exemple la classe « flux » peut prendre les valeurs « ok » ou « non-ok ». Dans le cas PRM, le nombre d'états est fini et ces états sont mutuellement exclusifs.

La définition des états des classes est réalisée en utilisant les informations issues de l'analyse dysfonctionnelle. Les états des flux d'entrée et de sortie sont définis comme des déviations de flux spécifiées dans les analyses HAZOP. Par exemple pour le système d'observation nous identifions trois modalités : la détection qui est l'état « nominal », et deux modalités de dysfonctionnement; les fausses-alarmes et les non-détections. De plus il est possible de spécifier les déviations de propriétés des flux comme le débit par exemple (Figure 44).

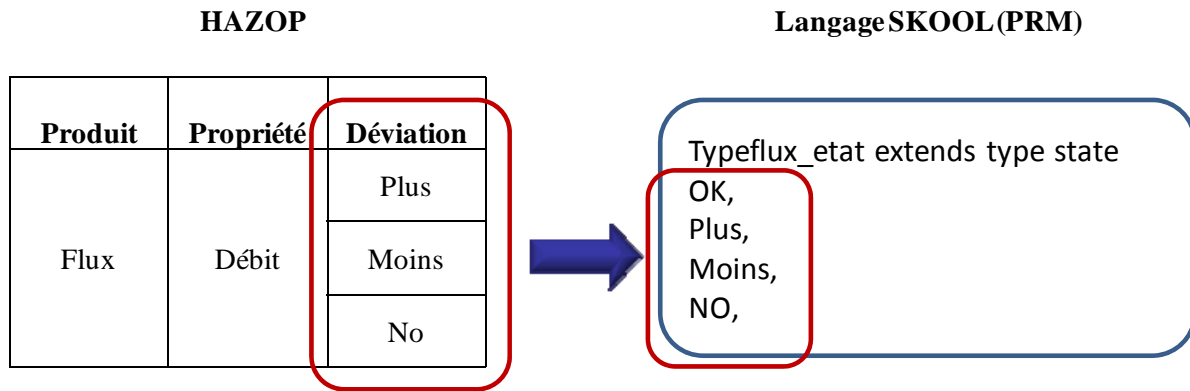


Figure 44. Définition des états des classes à partir d'une étude HAZOP

C. Phase 3 : Définition des probabilités conditionnelles pour les TPC des classes

La TPC détermine les dépendances entre les différents états des variables aléatoires par des probabilités conditionnelles. La quantification de ces probabilités conditionnelles est donnée par les historiques, la logique combinatoire, l'expertise ou des facteurs d'aggravation/amélioration. La phase de rationalisation des paramètres est développée dans le chapitre 4.

D. Phase 4 : Instanciation du modèle vers un modèle spécifique

Dans cette étape les concepts généraux définis dans les classes sont instanciés pour créer des objets spécifiques d'un système (Figure 18 - Point C), par exemple, pour la classe « flux » des types de flux spécifiques comme « flux gazeux », « flux liquide » seront définis. Cette phase permet la construction d'un modèle global d'évaluation des stratégies de maintenance par l'instanciation de chaque motif. La phase d'instanciation des motifs génériques à un système industriel particulier est illustrée dans le chapitre 5.

Pour vérifier la structure des motifs de modélisation il est possible de compiler le modèle PRM pour obtenir un réseau bayésien (grounding). De cette manière, des parties du modèle et les relations entre variables sont visualisables graphiquement.

Pour construire le modèle global à partir des motifs « individuels », il est nécessaire de réaliser une phase d'assemblage (les différents sous-réseaux) afin de modéliser des interactions entre le SP et le SM dans un même niveau d'abstraction (propagation des flux) ainsi que sur les différents niveaux d'abstraction (décomposition des flux).

3.3.2. Assemblage des motifs

a. Assemblage des motifs issus des différents points de vue

Nous avons spécifié comment construire à partir de modèles de connaissance métier des motifs génériques pour l'évaluation de stratégies de maintenance. Pour l'assemblage des motifs du SP et du SM, il est nécessaire de tenir compte des relations exprimées principalement dans la vue fonctionnelle à travers les échanges de flux. Tel que décrit dans le chapitre 2 (dans la section 2.2.5), l'élément en commun est l'équipement support d'une fonction. La fonction « transformer un flux entrant vers un flux sortant » a comme flux d'entrée un équipement maintenu issu de la

fonction « maintenir l'équipement ». Ainsi, la « disponibilité_environnementée » intègre l'impact de différents motifs du SM sur les performances du composant. Pour cela, la variable « disponibilité_environnementée » devient le flux d'entrée d'une fonction élémentaire du SP (Figure 45).

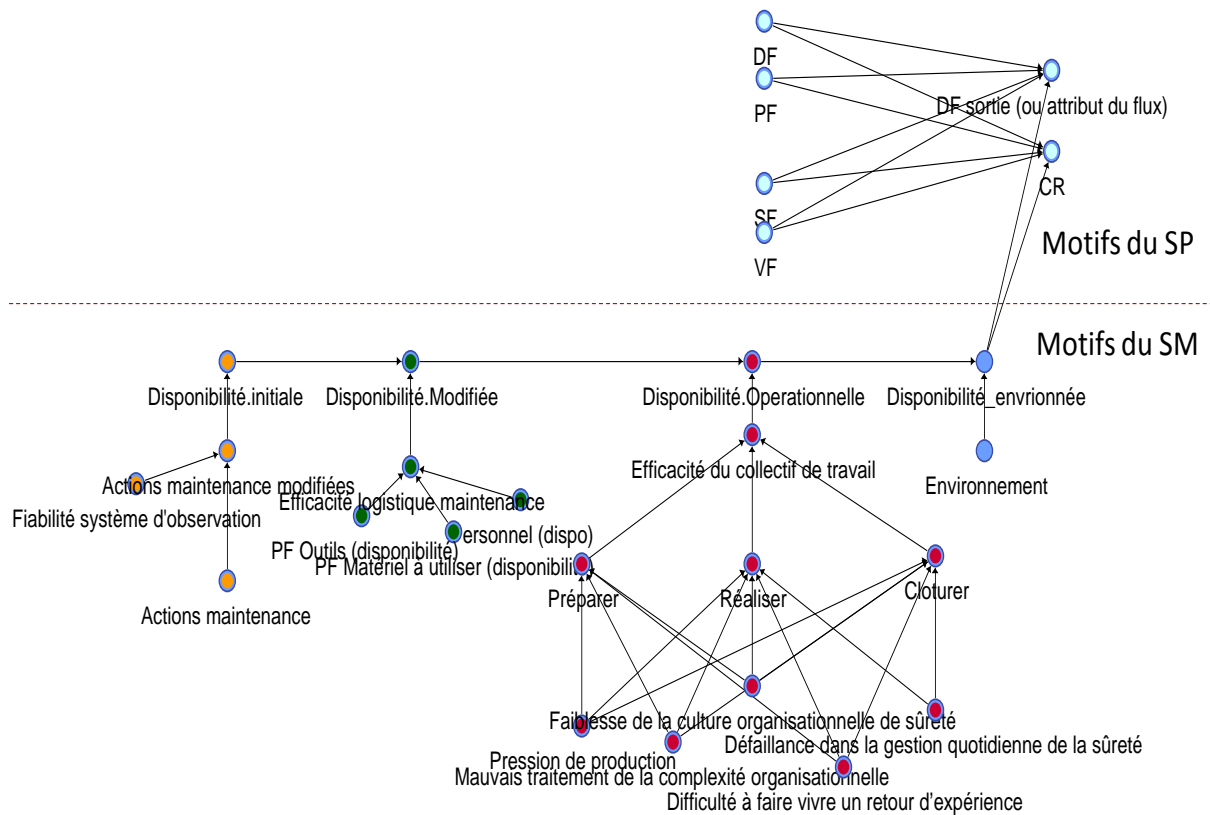


Figure 45. Assemblage des motifs du SP et du SM

Pour connecter les motifs instanciés d'un SP, il est donc nécessaire de considérer les échanges de flux entre les différentes fonctions. De cette façon il est possible de créer un modèle global pour évaluer l'impact du SM sur le SP sur un niveau d'abstraction « élémentaire » (Figure 46).

De plus, dans la section 1.3.4 nous avons exprimé le besoin de quantifier les performances du SP à différents niveaux d'abstraction, permettant aux responsables de maintenance d'obtenir une vision globale sur les performances du SP et du SM dans le but de faciliter le processus de prise de décisions.

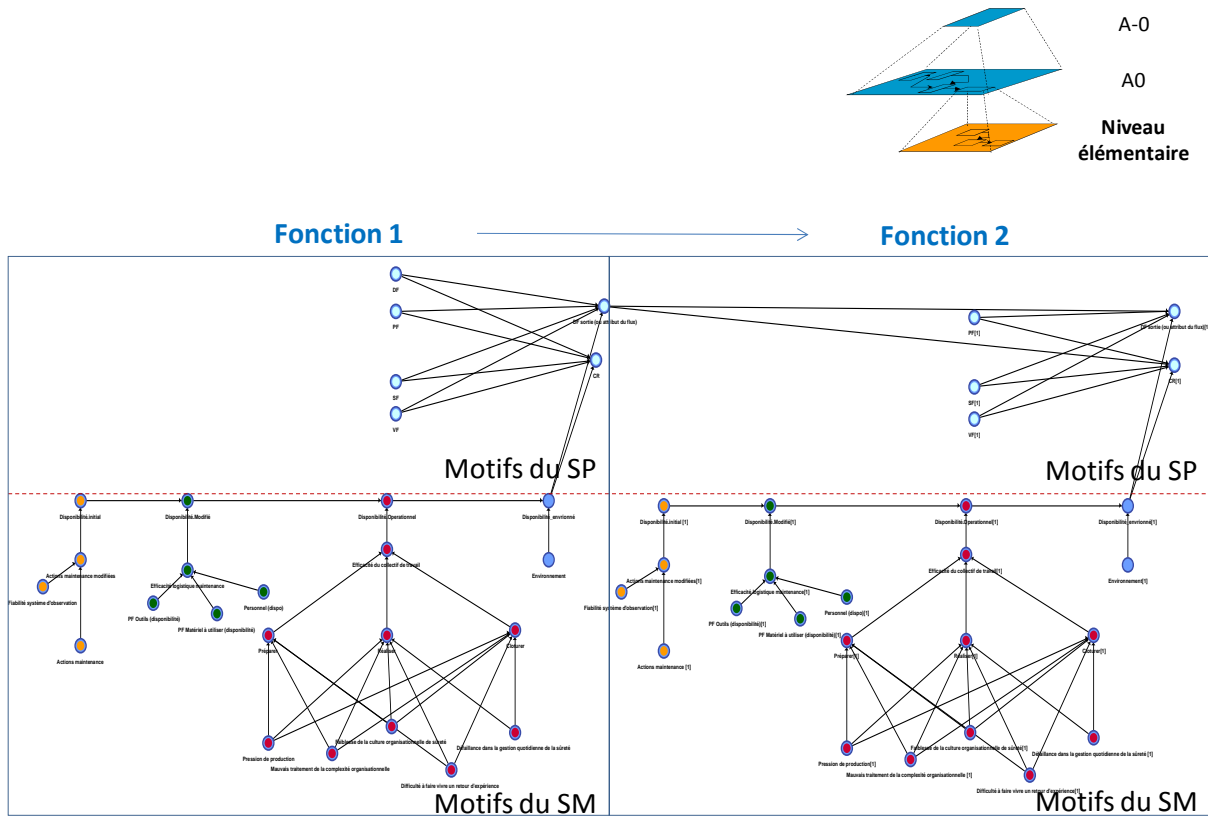


Figure 46. Assemblage des motifs des fonctions du SP au même niveau d'abstraction

b. Assemblage des motifs sur les différents niveaux d'abstraction

Le modèle et les motifs créés servent à quantifier les performances, tels que la conformité du flux d'un processus ou la disponibilité d'un composant sur un même niveau d'abstraction. Les responsables de la maintenance doivent, quant à eux, prendre des décisions pour l'amélioration des performances globales de la maintenance et du SP. Ces performances doivent être estimées au niveau système afin d'observer si les stratégies de maintenance en place sont capables de satisfaire les exigences de performances au niveau du SP et du SM en référence aux problématiques industrielles soulevées au chapitre 1. Or une grande quantité d'indicateurs, comme la disponibilité de chaque composant, rend difficile la tâche de synthèse des résultats au niveau des performances « système ». Pour cette raison, nous proposons d'agrèger les informations concernant les performances afin de quantifier celles-ci sur un ensemble d'indicateurs qui concentrent les informations sur un niveau d'abstraction supérieur.

Pour obtenir la connaissance sur un ensemble de niveaux d'abstraction, le modèle SADT nous propose une approche top-down. Mais la structuration du modèle PRM que nous proposons est basée sur une approche bottom-up. Cela demande donc tout d'abord de définir le niveau de décomposition souhaité du modèle SADT puis de structurer le modèle PRM depuis le niveau le plus bas vers des fonctions du SP plus globales et des niveaux supérieurs d'abstraction.

Ainsi nous proposons d'agrèger des indicateurs de performances du niveau « élémentaire » sur le motif du SP pour obtenir des indicateurs de niveau supérieur. Cela permet d'évaluer l'impact du SM sur la réussite de la fonction du système (flux CR) ou sous-système, ainsi que la conformité

du flux sortant d'une fonction (probabilité que le flux et les attributs du flux soient en état nominal). Pour agréger les différentes performances entre les différentes fonctions d'un même niveau d'abstraction, nous nous appuyons sur la structure fonctionnelle du système. Celle-ci permet de calculer la probabilité de réussite de la mission du système. Cette fonction spécifie les liens logiques entre les composants ou les fonctions à travers des relations explicitées dans le diagramme de fiabilité (DF) ou l'arbre de défaillance (AdD) permettant de relier différents niveaux d'abstraction du SP. Nous réalisons l'agrégation des connaissances en proposant des « règles d'assemblage » des connaissances. Pour cela, nous illustrons la démarche avec l'exemple d'un modèle SADT avec 2 niveaux d'abstraction pour construire les motifs du SP. Bien évidemment, chaque motif d'une fonction du SP au niveau élémentaire est assemblé avec chaque motif du SM. Les étapes se déroulent de la façon suivante :

1. Lorsqu'une fonction est décomposée à un niveau d'abstraction inférieur au sein du modèle SADT (Figure 47) (i.e. fonction A-0 décomposée en trois sous-fonctions), les flux DF entrée (DF « n » entrée) et DF sortie (DF « n » sortie) sont conservés dans le modèle PRM comme flux entrant et réciproquement sortant des sous-fonctions (Figure 47- flux en pointillés).

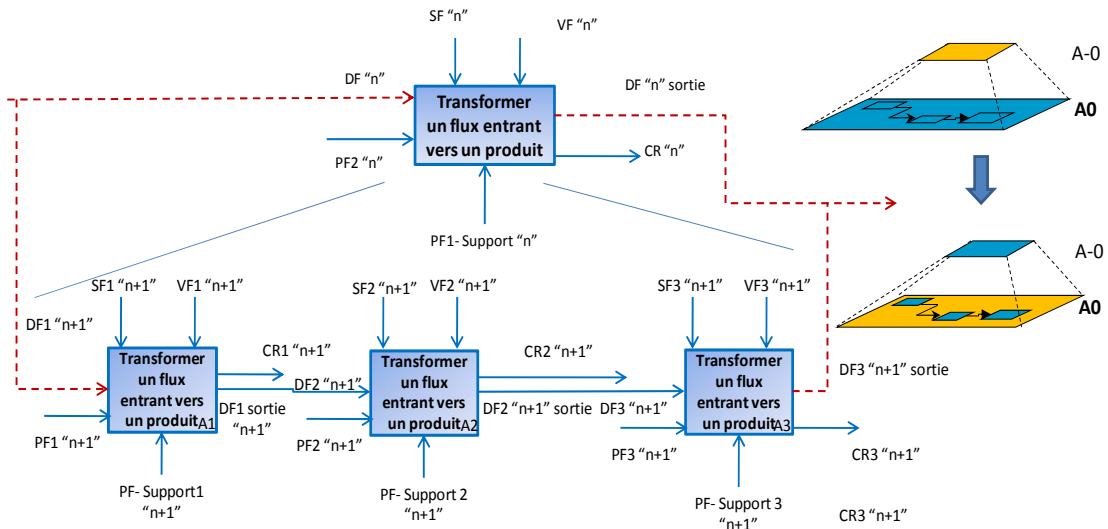


Figure 47. Décomposition fonctionnelle d'un SP en deux niveaux d'abstraction

La Figure 48 montre l'exemple de nœuds DF entrée/sortie au niveau « n » conservés comme nœuds d'entrée/sortie de sous-fonctions d'un niveau inférieur au sein du modèle PRM. Alors, le DF entrant (flux principal) d'une fonction de niveau supérieur « n » est le même flux DF entrant dans la première fonction du niveau d'abstraction immédiatement inférieur « n+1 ». Le DF sortie est calculé maintenant à partir des nouveaux flux de chaque sous-fonction uniquement (flux plus détaillés grâce à la décomposition). De cette façon, le flux sortant « DF sortie » d'un niveau d'abstraction « n+1 » est identique à celui de la fonction de niveau « n ».

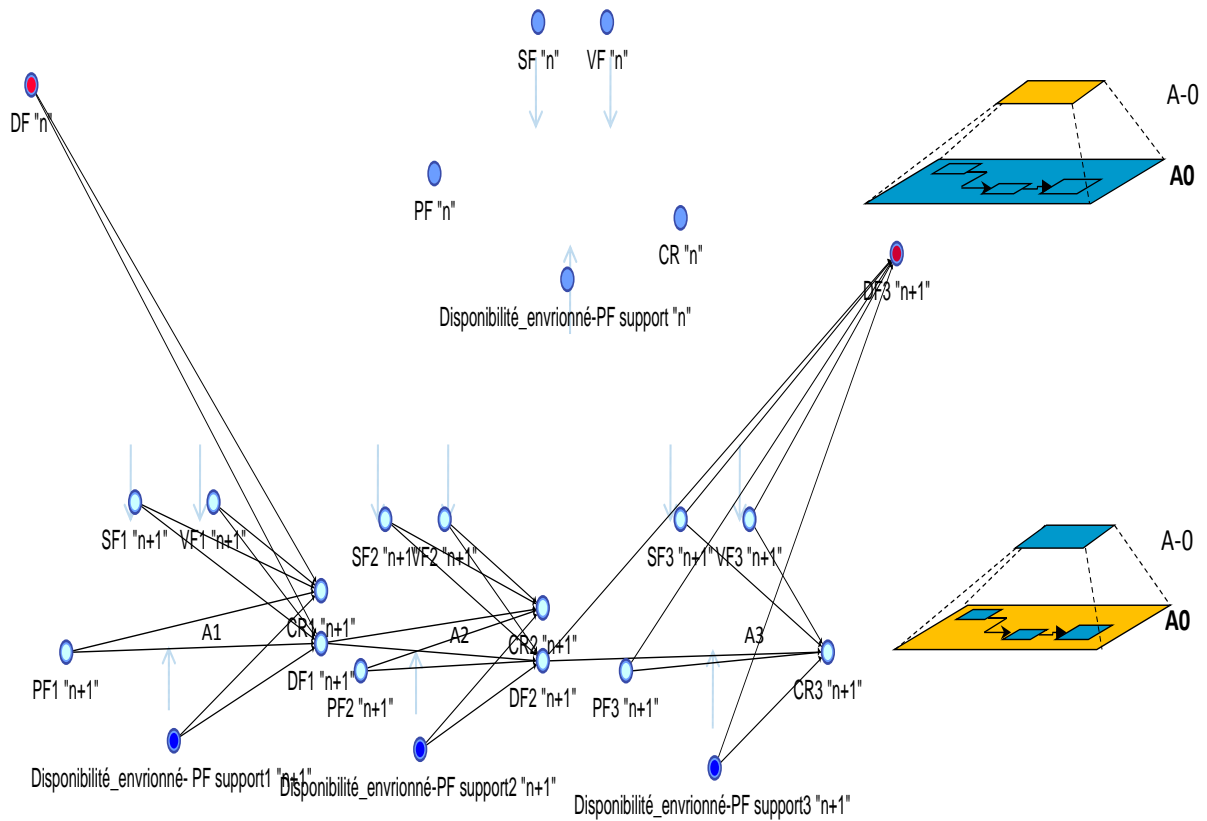


Figure 48. Conservation des nœuds DF "n" entrée/sortie lors de la décomposition d'une fonction

2. En revanche, les flux de type SF, VF et PF sont déconnectés afin d'obtenir de nouveaux flux entrant SF, VF et PF (flux plus décomposés, plus détaillés - Figure 49). Par exemple le nœud PF « n » est décomposé vers plusieurs nœuds d'entrée de chaque sous-fonction du niveau « n+1 », les nœuds PF1 « n+1 », PF2 « n+1 », PF3 « n+1 ». Au sein du modèle PRM, ces nouveaux flux sont intégrés au modèle (PF1 « n+1 », PF2 « n+1 », PF3 « n+1 ») alors que leur flux agrégation (PF « n ») est déconnecté. De façon similaire le nœud SF « n » est décomposé vers les nœuds SF1 « n+1 », SF2 « n+1 », SF3 « n+1 », et ainsi de suite pour chacun des nœuds du type SF, VF et PF.
3. L'estimation de la distribution de probabilité sur les états de fonctionnement et dysfonctionnement d'une fonction « flux informationnel CR » de niveau d'abstraction « n » est calculée à travers les différents flux de décomposition au niveau « n+1 », CR1 « n+1 », CR2 « n+1 » et CR3 « n+1 » (Figure 50). Ces flux sont agrégés en utilisant la fonction de structure de ses sous-fonctions (au niveau n+1) (connaissance issue des études en SdF comme dans les diagrammes de fiabilité ou les arbres de défaillance), basés sur des fonctions ET logique (série), OU logique (parallèle) ou k/n. Pour le calcul sur le PRM il est donc possible d'utiliser des quantificateurs.

Par l'exploitation de ces différents principes (agrégation, décomposition de flux...) il est donc possible de quantifier à différents niveaux les performances et plus spécifiquement au niveau système, sous-système et composant. Cette quantification est directement basée sur la prise en compte dans la modélisation de l'impact de différentes stratégies de maintenance sur le calcul des indicateurs (KPI), comme la qualité produite et les coûts.

3.4. Impact des stratégies de maintenance sur les performances du SP

Dans le modèle proposé, il est possible d'estimer certaines performances du SM, comme la disponibilité du composant, l'efficacité du système de logistique pour supporter les activités de maintenance et l'efficacité du personnel. Toutefois comme précisé par (Parida, 2006), il faut aussi considérer l'impact du SM sur le SP, et pouvoir estimer les performances du SP. Pour illustrer cela, nous proposons de prendre en compte plus spécifiquement les performances liées à la qualité et les coûts globaux. Ces performances sont formalisées et intégrées au sein de l'ensemble de motifs génériques.

3.4.1. Impact des stratégies de maintenance sur l'aspect qualité du SP

Les performances sur la qualité (De Toni et al., 1995), (Noci, 1995), (Adam et al., 1997) sont différenciées en : qualité produite, qualité perçue, qualité des fournisseurs et le coûts de la qualité.

Pour modéliser la qualité produite, (Deeb, 2008) définit une classe appelée « Exigence produit de sortie » qui intègre les transformations des attributs des flux réalisés dans un processus (temps-forme ou temps-espace) (Mayer, 1995). En ce sens, un produit est considéré comme conforme lorsqu'il satisfait : « les exigences temps », « les exigences espace » et « les exigences forme ».

3.4.1.1. Impact des stratégies de maintenance sur l'aspect qualité du SP au sein du modèle PRM

Pour estimer la probabilité d'avoir un flux sortant avec une qualité produite conforme, au sein de notre modèle PRM il suffit d'agréger les différentes variables correspondant aux attributs (correspondant aux exigences de temps, forme, espace) dans une variable nommée « Conformité du flux » (Figure 51), avec trois modalités CF= {nominal (OK), dégradé, non-conforme (NOK)}.

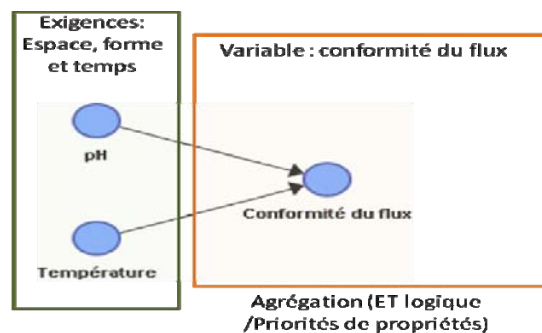


Figure 51. Variable d'agrégation conformité du flux

Les états de ces variables sont définis sur l'HAZOP comme des déviations de propriétés de flux.

Ainsi dans la TPC, il est possible d'exprimer des priorités sur certaines propriétés des flux. Par exemple, nous avons un flux avec deux attributs principaux : le pH et la température. Pour que le produit soit conforme il faut que les deux propriétés le soient également, néanmoins si la température n'est pas conforme, le produit peut être retravaillé pour le mettre en conformité mais si le pH est non-conforme, le produit sera mis au rebut. La Tableau 9 montre comment nous pouvons associer les probabilités pour représenter la priorité de certains attributs par rapport aux autres. Selon les cas plusieurs manières peuvent être utilisées pour modéliser l'impact des attributs de flux sortant sur la conformité de flux. Pour le cas où la température n'est pas conforme mais le pH l'est, nous ajoutons une modalité décrivant une conformité partielle comme : conformité de flux = dégradé. Donc nous associons une probabilité de 1 à l'état dégradé si la température n'est pas conforme. En revanche, si le pH est non-conforme, le produit est non-conforme automatiquement.

pH	Température	OK	Dégradé	NOK
OK	OK	100	0	0
OK	NOK	0	100	0
NOK	OK	0	0	100

Tableau 9. TPC Priorités sur des propriétés de flux

3.4.2. Impact des stratégies de maintenance sur les coûts dans les évaluations des stratégies de maintenance

Un second aspect à intégrer dans notre modèle est les coûts liés à la fabrication de produits et au MCO du SP. Les coûts de la maintenance sont une des performances les plus importantes dans le secteur industriel. Pour prendre en compte les impacts financiers dans notre modèle d'évaluation de stratégies de maintenance, nous intégrons des nœuds d'utilités qui permettent d'estimer une valeur « moyenne » des coûts en fonction de la probabilité d'occurrence des différents scénarios (modalités).

3.4.1.2. Coûts considérés dans l'évaluation des stratégies de maintenance

Pour prendre en compte les impacts financiers dans des modèles d'évaluations de stratégies de maintenance, (Marseguerra et Zio, 2000) proposent la maximisation d'une fonction objectif qui intègre différents éléments au niveau financier d'une entreprise.

$$G = P - CA - CM - CR - C_{team} - CD - CACC \quad (7)$$

P: Chiffre d'affaires de l'opération de l'entreprise.

CA: Coûts d'achats et installation.

CM: Coûts de maintenance.

CR: Coûts de réparation.

C_{team}: Coûts du personnel.

CD: Pénalisation due au temps passé en état hors service.

CACC: Coûts des dommages et des conséquences externes (dans le cas où il y a des accidents).

Ces différents éléments sont pris en compte dans différentes approches telles que proposées par (Léger, 1999), (Monchy, 2000) et (Lyonnet, 1991).

- *Chiffre d'affaires (P)* : cet élément est calculé en fonction du nombre de produits réalisés (n) et du prix de vente d'un produit (PV).

$$P = n * PV \quad (8)$$

Dans le domaine d'évaluation des stratégies de maintenance (Marseguerra et Zio, 2000) font une estimation des chiffres d'affaires en fonction de la disponibilité du système ($A(Tm)$) et du prix par unité de temps payé par les clients pour le fonctionnement du système de production (Pt).

$$P = Pt * f(A(Tm)) \quad (9)$$

En relation aux différents coûts nécessaires pour la fabrication des produits, il est possible de distinguer deux méthodes de classification classiques :

- La classification des coûts : fait référence à la classification de coûts en catégories pour la préparation des états financiers ou pour la construction des modèles d'aide à la décision. Cette méthode identifie les coûts directs et indirects. Les coûts directs contribuent directement à la valeur ajoutée du produit, par exemple, le matériel utilisé pour sa fabrication. Les coûts indirects ne contribuent pas directement à l'obtention du produit final mais plutôt au support des opérations pour l'élaboration des produits (par exemple les coûts de maintenance).
- Le comportement des coûts : fait référence à l'effet du volume de production sur les coûts. Cette catégorie comprend les coûts fixes et les coûts variables. Les coûts fixes sont considérés indépendants du volume de la production et les coûts variables changent en fonction du niveau d'activité de l'entreprise (Cooper et Kaplan, 1992).

Dans le cadre de la fonction (7) il est possible de distinguer des *coûts fixes* comme par exemple les CA. L'amortissement des composants dans l'installation fait partie des coûts fixes (Monchy, 2000).

- *Coûts de Maintenance (CM) et coût de réparation (CR)* : Ce sont des coûts liés aux remplacements des composants. Ces éléments sont calculés en fonction du nombre d'intervention sur « N_c » composants et de coûts d'intervention (quantifié soit par unité du temps soit par nombre d'interventions).

$$CM = \sum_{j=1}^{N_c} N_j CM_j \quad (10)$$

(Léger, 1999) prend en compte également des coûts liés aux pièces détachées et au stockage des pièces.

- *Coûts du personnel (Cteam)* : ils intègrent les salaires des équipes chargées des réparations. Pour (Marseguerra et Zio, 2000) ces coûts sont considérés comme fixes. Il y a d'autres approches qui considèrent les coûts de la main d'œuvre en fonction du temps passé sur

l'intervention (T_{int}) et du coût horaire de l'opérateur de maintenance (Ch), tel que proposé par (Léger, 1999) :

$$C_{team} = T_{int} * Ch \quad (11)$$

- *Coûts de pénalisation (CD)* : Lorsqu'il y a une défaillance il y a des coûts additionnels issus d'éléments comme la perte en qualité, la perte de production, etc.

$$CI = C. \text{perte production} + C. \text{main d'œuvre inoccupée} + C. \text{non - qualité} + C. \text{arrêts} \\ + C. \text{redémarrage} + C. \text{induits en cas d'accidents} + C. \text{pour délais} \quad (12)$$

Les coûts de pénalisation d'une défaillance sont estimés par (Crespo, 2008) comme les pertes de production en fonction du temps du composant passé en état HS, avec :

$$CLPF = C_{DT} \times \sum_{i=1}^{i=n-1} DT_i \quad (13)$$

DT_i : Temps HS (downtime).

C_{DT} : Coûts par unité de temps HS.

De façon similaire (Dhillon, 1999) intègre les coûts moyens d'une défaillance. Ils sont également proportionnels au temps hors service du composant à travers :

$$AC = [HC(MTTR + RT) + ALC] + [LSC(MTTR + RT) + MAC] + RPC \quad (14)$$

HC : coût de réparation par heure de l'organisation

MTTR : temps moyen de réparation

RT : temps de réponse pour réparer le composant

ALC : pertes administratives due à la défaillance

LSC : perte de service par heure

MAC : coût d'annulation de la mission.

RPC : coûts de remplacement des pièces.

(Marseguerra et Zio, 2000) considèrent une pénalisation due à la période hors service en fonction de l'indisponibilité du système :

$$CD = f(1 - A(Tm)) \quad (15)$$

- *Coûts de dommage (CACC)* : ce sont des coûts générés dans le cas où il y a des accidents qui se produisent (Marseguerra et Zio, 2000).

Une fois identifiés les éléments principaux des coûts liés à l'évaluation des stratégies de maintenance ainsi que la façon de les modéliser au sein d'une fonction « objectif », nous

proposons d'adapter et d'intégrer ces éléments à notre modèle afin d'estimer en termes financiers l'impact des choix de maintenance.

3.4.1.3. Proposition d'une fonction intégrant les coûts de maintenance

En reprenant certains éléments des différentes contributions présentées dans la section précédente, nous proposons une fonction qui quantifie au global les bénéfices en intégrant le total des ventes de biens et de services d'une entreprise ainsi que les coûts issus de la production de biens et de la réalisation des actions préventives et correctives de maintenance. Cette fonction est intégrée dans la section suivante au sein des motifs génériques.

$$B = VA - CF - CP - CM - CL - CP - CD \quad (16)$$

B : Bénéfice

VA : volume d'affaires

CF : Coûts fixes

CP : Coûts de production

CM : Coûts de maintenance

CL : Coûts de logistique

CP : Coûts du personnel

CD : Coûts de pénalisation

- Volume d'affaires (VA) : représente les chiffres d'affaires dégagés par la vente de la production.
- Coûts fixes (CF) : intègre les coûts indépendants de l'activité de l'entreprise, tels que le loyer, les coûts liés à la gestion du personnel...
- Coûts de production (CP) : cette variable prend en compte les coûts liés à l'énergie et aux matières premières pour la fabrication des produits.
- Coûts de maintenance (CM) : cette variable prend en compte les coûts liés à l'énergie et aux coûts direct des consommables et pièces de rechanges pour la réalisation des activités liées à la maintenance.
- Coûts de logistique (CL) : ces sont des coûts associés au stockage des pièces de rechange.
- Coûts du personnel (CPer) : ces sont des coûts associés à la charge du personnel de maintenance.
- Coûts de pénalisation (CD) : cet élément considère des coûts liés à l'indisponibilité comme les pertes de production ainsi que le coût dû à la non-conformité du produit.

3.4.1.3.1. Intégration des coûts vers un modèle PRM

Pour prendre en compte ces coûts au sein de notre modèle PRM, les impacts financiers sont décomposés en :

- Volume d'Affaires (VA) (où nous trouvons le bénéfice maximum dégagé par la production tel que réalisé par (Marseguerra et Zio, 2000)) dépendant de l'état du nœud « CR fonction système » (prend en compte aussi les coûts liés à l'indisponibilité (CD)),
- les coûts de production (CP) dépendant aussi de l'état du flux final représenté par le nœud « CR fonction système» (coûts liés à l'énergie et aux matières premières),
- les coûts de maintenance (CM) dépendant de l'état du nœud « Actions de maintenance modifiées »,
- les coûts de logistique (CL) dépendant des nœuds « PF Outils » et « PF Matériel à utiliser »,
- les coûts de pénalisation (CD) dépendant du nœud « Actions de maintenance modifiées » et
- les coûts fixes (Monchy, 2000).

Si plusieurs fonctions sont définies, il y aura un seul nœud qui regroupe les coûts CL et CPer associés à plusieurs fonctions (Figure 52).

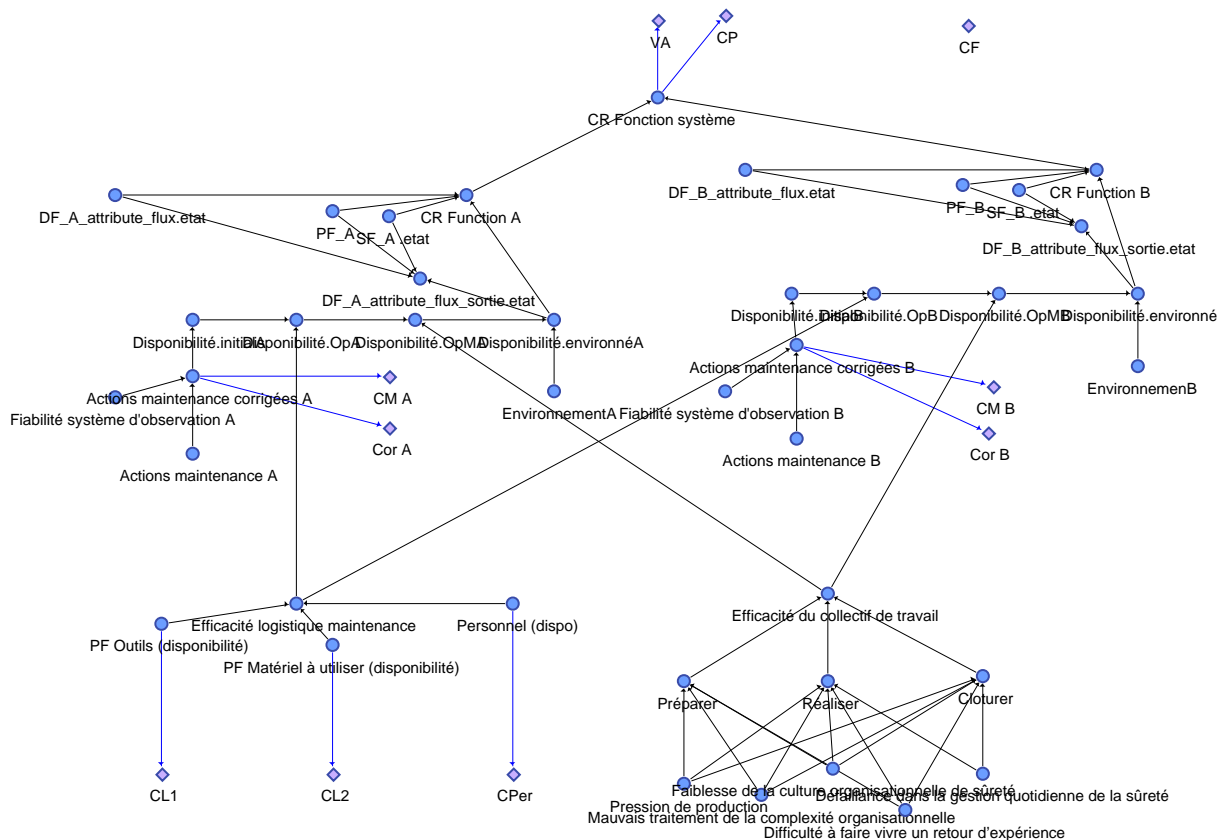


Figure 52. Coûts associés à l'évaluation des stratégies de maintenance

Cette approche ne représente pas nécessairement les coûts réels engendrés par les opérations de production et de maintenance puisqu'au sein du PRM nous considérons les coûts pondérés par des probabilités en fonction de différents scénarios. Ce sont des fonctions d'utilité qui permettent le calcul de l'espérance mathématique des coûts en fonction des probabilités associées à chaque modalité. Cette fonction permet donc de réaliser plutôt une comparaison entre différentes stratégies de maintenance en estimant des tendances en termes financiers (Weber et Suhner, 2003). L'intégration des coûts au sein du PRM à travers des nœuds d'utilité est montrée dans l'annexe 1.

La Figure 52 représente le diagramme d'influence qui traduit les impacts financiers liés aux états du nœud représentant la fonction principale « CR Fonction », au nœud « Actions de maintenance modifiées », au nœud « PF Matériel à utiliser (disponibilité) » et au nœud « Personnel (dispo) ». L'évaluation de la performance globale est possible grâce à ces nœuds d'utilité notés U_{VA} , U_{CP} , U_{CM} , U_{CoR} , U_{CL} et U_{CPer} .

Ce sera donc un modèle visant la maximisation de l'espérance de l'utilité (EU) (Weber et Suhner, 2003). De cette façon il sera possible de comparer les différentes stratégies de maintenance.

3.5. Conclusion

La contribution majeure mise en évidence dans ce chapitre consiste en la construction de motifs génériques « interconnectables » basés sur les règles sémantiques définies au chapitre 2. Ces motifs génériques peuvent être stockés en bibliothèques (composants sur étagère, COTS) et utilisés pour définir un modèle particulier à partir d'une phase d'instanciation au cas traité (Figure 18 – Point B).

Nous avons justifié, pour la modélisation de ces motifs, l'utilisation des RB et plus spécifiquement de la déclinaison PRM. Ces motifs sont ainsi décrits en PRM en exploitant le langage Skool créé dans le cadre du projet SKOOB. Nous avons montré comment ce langage répond bien aux besoins de modélisation pour les évaluations des stratégies de maintenance.

La construction de ces motifs repose sur trois phases : la modélisation des motifs sous la forme de RB puis à base de classes sous Skool, la définition des états de classes et la définition des TPC des classes.

Les motifs ainsi créés sont assemblables par des principes de relations de dépendances dans les échanges des flux des fonctions dans un même niveau d'abstraction ainsi que par des liens logiques entre fonctions pour différents niveaux d'abstractions, pour obtenir le modèle global exécutable. Pour rendre ce modèle plus pertinent, nous avons intégré sous la forme des nœuds décisionnels, les notions de coûts et de qualité produite.

Le modèle global est donc apte à supporter l'évaluation des stratégies à condition de résoudre la problématique du paramétrage des motifs probabilistes génériques. Ceci fait l'objet du chapitre 4.

Chapitre 4

Rationalisation de paramètres probabilistes pour des motifs génériques de modélisation

4.1. Introduction

La structure des motifs génériques définie dans le chapitre précédent nécessite une phase de détermination des paramètres des motifs concernant le plan de maintenance, l'efficacité de la logistique, etc. avant de pouvoir exécuter et quantifier les différents scénarios probables sur les différentes gammes de maintenance. Ces paramètres sont insérés ensuite dans les tables de probabilités conditionnelles (TPC) de chaque « classe PRM ». Selon (Wang et Pham, 2006) et (Dekker et Scarf, 1998) une partie des modèles existants en maintenance et en sûreté de fonctionnement (SdF) se focalisent sur la proposition de modèles probabilistes et négligent la partie de paramétrage de ces modèles. Ainsi ils ne spécifient pas où chercher la connaissance et comment la traiter pour obtenir les paramètres adéquats. Ceci aboutit à un réel écart entre les modèles théoriques et leur application concrète à des cas industriels réels.

Pour faire face à ce problème, ce chapitre présente une première réponse à la définition des paramètres pour les motifs génériques présentés précédemment à travers l'étude de méthodes de quantification des probabilités du modèle (Figure 18- Point C). La valeur ajoutée de notre proposition réside dans l'utilisation et l'adaptation de méthodes bien adaptées aux cas industriels réels et qui visent à intégrer et à exploiter le retour d'expérience. Dans le cas où il n'existe pas de retour d'expérience, il est possible d'exploiter la connaissance d'experts.

4.2. Phase de rationalisation des paramètres des motifs génériques

Dans le chapitre précédent nous nous sommes focalisés dans la phase de modélisation de la structure de motifs génériques du SP et du SM. Ces motifs contiennent des relations de dépendances toutefois ces relations au sein des PRM sont estimées à travers des probabilités conditionnelles.

Il est donc nécessaire de développer une phase de quantification des paramètres qui comprend deux étapes : (1) la définition des modalités de chaque variable et (2) la spécification de méthodes propres pour l'estimation des probabilités conditionnelles en fonction de la nature de la variable.

4.2.1. Modalités des motifs du SP et du SM

Les modalités des variables de motifs génériques ont été définies en se basant sur les informations extraites des analyses dysfonctionnelles.

a. Motifs de modélisation des fonctions du SP (Figure 36)

- **Nœuds PF, DFentrant, VF, SF : Flux entrants (nœuds parents)**

Au delà de l'état nominal, les autres états de ces flux sont spécifiés dans une étude HAZOP comme la déviation des propriétés de flux. Par conséquent plusieurs états pour ces flux peuvent être identifiés. Par exemple la température d'un flux peut être en état nominal ou dévié en fonction de plus ou moins de température.

- **Nœuds DFsortie : Flux sortant (nœud fils)**

De façon similaire aux nœuds précédents, les états de ces flux sont également spécifiés dans l'étude HAZOP.

- **Nœud CR : Flux sortant (nœud fils)**

Ce flux contient l'information sur la réussite de la fonction. Deux macro-états sont donc associés : « Ok » pour le cas où la fonction est réussie ou « Non-OK » pour le cas où elle ne l'est pas.

b. Motifs de modélisation du SM (Figure 43)

b.1. Motifs de modélisation du plan de maintenance

- **Nœuds « Actions de maintenance » et « Actions de maintenance modifiées »**

Ces nœuds regroupent les différents types d'actions avec différentes efficacités qui sont réalisées sur un composant. Il existe plusieurs modalités pour prendre en compte le type de l'action et l'efficacité de la maintenance : « corrective minimale », « corrective parfaite », « systématique parfaite », « systématique minimale », « systématique imparfaite », « conditionnelle parfaite », « conditionnelle minimale », « conditionnelle imparfaite » (les actions prévisionnelles peuvent être intégrées et traitées de façon similaire aux actions conditionnelles). La totalité de ces modalités n'est pas obligatoire cela dépend des types de maintenance que l'on souhaite prendre en compte dans le modèle.

- **Nœud « Fiabilité du système d'observation »**

La fiabilité du système d'observation est définie comme nominale, c'est-à-dire qu'il détecte normalement les dysfonctionnements du système et dans ce cas son état est « détection » ou il y a une déviation dans la fiabilité de l'observation et dans ce cas, les déviations possibles sont définies en deux modalités : « fausse-alarme » et « non-détection ».

b.2. Motifs de modélisation de l'efficacité de la logistique

- **Nœuds sur la disponibilité des ressources « Pièces de rechanges et outils » et nœud « Personnel (disponibilité) »**

Dans ce nœud les ressources (pièces de rechanges, outils...) sont considérées comme étant « disponibles » lorsqu'il est nécessaire de réaliser les interventions de maintenance ou « non-disponibles ».

c. Nœud « Efficacité de la logistique de maintenance »

Lorsque la logistique remplit sa fonction de support au SM au moment voulu, elle est considérée comme « efficace ». Dans le cas contraire l'intervention ne peut pas être réalisée et la logistique est dite « non-efficace ».

b.3. Motifs de modélisation de l'efficacité du collectif du travail

- Nœuds « facteurs organisationnels pathogènes (FOPs)»

Chaque FOP peut être « présent» ou «absent » en fonction de son existence ou non.

- Nœud « Efficacité du collectif de travail et de l'organisation de la maintenance»

Lorsque le collectif humain remplit sa fonction de façon adéquate, il est considéré comme « efficace ». Sinon il est considéré comme « non-efficace ».

b.4. Motifs de modélisation de l'environnement

- Nœud « Environnement »

L'ensemble des facteurs environnementaux se trouve dans un état « nominal » lorsque les conditions de fonctionnement auxquelles le composant est exposé sont dans la plage des conditions pour lesquelles le composant a été conçu. Si l'ensemble des conditions se trouve en dehors de cette plage alors les conditions sont dans un état « non-nominal ».

- Nœuds « Disponibilité_initiale », « Disponibilité_modifiée», « Disponibilité_opérationnelle», « Disponibilité_environnée »

Ces nœuds se regroupent sur deux macro-états, « disponible » lorsque le composant est opérationnel ou « non-disponible » lorsqu'il ne l'est pas.

Sur la base de ces modalités, nous avons proposé une méthodologie pour le paramétrage des variables en définissant des probabilités conditionnelles puis leur intégration dans les tableaux de probabilités conditionnelles associés à chaque variable. Pour cela nous avons spécifié également plus spécifiquement comment traiter la connaissance et les données terrains afin de calculer les paramètres.

4.2.2. Quantification des motifs liés au SP (Figure 36)

- Nœuds PF, DFentrant, VF, SF : Flux entrants (nœuds parents)

Les flux entrants qui sont sous la forme des nœuds racines au sein du modèle PRM, sont quantifiés à travers des jugements d'experts ou par retour d'expérience sur le fonctionnement du processus. Aussi, l'estimation des probabilités peut être réalisée en utilisant l'analyse bayésienne qui permet de combiner les jugements d'experts et les données de retour d'expérience.

Il peut s'agir d'une distribution uniforme lorsqu'il y a de l'incertitude sur l'état des variables ou d'une distribution particulière lorsqu'il existe une certaine connaissance à priori.

- **Nœuds CR et DFsortie : Flux sortants (nœuds fils)**

Les flux sortants dépendent de l'état des flux entrants. La définition des probabilités conditionnelles est basée sur la logique combinatoire ou l'expertise. Par exemple, pour réaliser une fonction, il peut être nécessaire que tous les flux soient dans un état nominal sinon la fonction n'est pas réalisée (visible à travers le CR en état non-nominal) et le flux de sortie n'est pas conforme (visible à travers le DFsortie en état non-nominal).

Les relations entre les sous-fonctions sont modélisées par des fonctions logiques. Il est possible de modéliser les sous-fonctions en parallèle ou en série tel que décrit dans les arbres de défaillances ou les diagrammes de fiabilité.

4.2.3. Quantification des motifs liés au SM (Figure 43)

a. Quantification du motif « Plan de maintenance »

- **Nœud « Actions de maintenance »**

Le modèle proposé est un modèle statique bien qu'une des caractéristiques des interventions de maintenance soit leur fréquence (norme FD X 60-000, 2002). Pour prendre en compte cette notion dans l'évaluation des stratégies de maintenance, nous proposons de la modéliser par une variable appelée « Actions de maintenance » (AM). Cette variable a plusieurs modalités représentant les types d'actions avec une efficacité donnée $AM = \{\text{corrective minimale, corrective parfaite, systématique parfaite, systématique minimale, systématique imparfaite, conditionnelle parfaite, conditionnelle minimale, conditionnelle imparfaite}\}$.

Dans ce nœud, il faut spécifier la probabilité d'une action de chaque type avec une efficacité donnée. Pour cela, (Mendenhall et al., 2009) proposent une façon pratique de calculer la probabilité d'un événement A à travers sa fréquence relative :

$$\text{Fréquence relative} = \text{Fréquence} / n \quad (17)$$

Où :

n : nombre de fois qu'est réalisée une expérience

Fréquence : nombre d'occurrences de l'événement A.

Si n devient très grand ($n \rightarrow \infty$) cela va générer toute la population. Dans cette population, la fréquence relative de l'événement A est définie comme la probabilité de l'événement A tel que :

$$P(A) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\text{Fréquence}}{n} \quad (18)$$

$P(A)$ est une probabilité entre 0 et 1.

Pour calculer la probabilité d'erreur humaine (Latorella et Prabhu, 2000) utilisent le ratio entre le nombre d'erreurs dans un intervalle de temps t et le nombre d'opportunités d'occurrence.

Dans notre cas, la population est composée par toutes les actions de maintenance dans un intervalle de temps et les événements sont les actions correctives et préventives avec chaque type d'efficacité. Donc, pour calculer ces probabilités, il faut estimer le ratio pour chaque type de maintenance avec une efficacité donnée en utilisant l'historique des actions de maintenance. Nous pouvons estimer par exemple la probabilité d'une action de maintenance systématique parfaite sur l'ensemble des actions de maintenance ($P(AM = \text{systématique parfaite})$) associé à un composant. Elle est obtenue de la façon suivante :

$$\hat{P}(AM = \text{systématique parfaite}) = X_{OT\ SYSPAR} / (X_{OT\ TOTAL}) \quad (19)$$

Où :

$X_{OT\ SYSPAR}$: Nombre d'Ordres de Travail (OT) systématique parfaite

$X_{OT\ TOTAL}$: Nombre d'OT total

Cette procédure est appliquée à chacune des modalités ({corrective minimale, corrective parfaite, systématique parfaite, systématique minimale, systématique imparfaite, conditionnelle parfaite, conditionnelle minimale, conditionnelle imparfaite}).

- **Nœud « Fiabilité du système d'observation »**

Le nœud « fiabilité du système d'observation » est un nœud racine. Ses trois états sont illustrés sur le Tableau 10 : $SO = \{\text{Détection, non-détection, fausse alarme}\}$.

Fausse alarme	Non-détection	Détection
3	1	96

Tableau 10. TPC du nœud « fiabilité du système d'observation »

La probabilité de non-détection peut être estimée à travers l'analyse de l'historique des actions correctives issues de la non-détection du système d'observation. La probabilité de fausse alarme peut être estimée de façon similaire. Néanmoins, si le système est en conception où le retour d'expérience est très faible, nous pouvons considérer que le système d'observation est parfait et que la finesse du modèle pourra être améliorée au cours du temps.

- **Nœud « Actions de maintenance modifiées »**

Le système d'observation impacte les types d'actions définies dans le plan de maintenance. Donc, les actions de type corrective et systématique resteront telles que prévues dans le plan puisqu'elles n'ont pas besoin d'un système d'observation. En revanche, les proportions de maintenance préventives conditionnelles (ou prévisionnelles) seront sensibles à l'état du nœud « fiabilité du système d'observation ».

Le système d'observation va impacter le type d'action prévu dans le plan de maintenance, c'est pour cela que nous l'appelons « actions de maintenance modifiées ». Quand il y a une non-détection, les tâches préventives sont remplacées par une tâche corrective (en faisant l'hypothèse que les composants tombent en panne dû à une non-détection). Dans le cas d'une fausse alarme, une action sera réalisée sur un composant en bon état (Simpson et Sheppard, 1992), l'action

préventive sera considérée comme minimale (n'améliore pas l'état du composant et la disponibilité est aggravée à cause du temps hors service) et les coûts augmentent. Pour illustrer cette notion, nous développons un petit exemple. Le plan de maintenance possède la distribution de probabilité suivante (Tableau 11).

C. parfait	C. minimal	S. parfait	S. imparfait	Con. Parfait	Con. Imparfait	Con. Minimal
10	0	15	0	25	30	20

Tableau 11. TPC du nœud « Actions de maintenance »

L'erreur de non-détection se produit par exemple avec une probabilité de $P(X_i = \text{non détecté} / D_i = \text{produite}) = 0,01$ (X_i : variables du système d'observation et D_i : variables de défaillance). Cette probabilité modifie les probabilités initiales prévues dans le plan de maintenance. Alors pour une non-détection, les tâches préventives sont remplacées par des tâches correctives d'une efficacité « i » (en supposant que les composants tombent en panne à cause d'une non-détection), dans notre cas d'efficacité parfaite. D'un autre côté, l'erreur de fausse alarme se produit par exemple avec une probabilité de $P(X_i = \text{détecté} / D_i = \text{non - produite}) = 0,03$. Une action sera alors réalisée sur un composant en bon état et l'action conditionnelle sera considérée comme minimale (n'améliore pas l'état du composant et la disponibilité est aggravée à cause du temps HS). Dans ce cas les coûts augmentent également. Le Tableau 12 montre la TPC pour les cas où il y a non-détection pour des actions conditionnelles qui deviennent des actions correctives. Pour le cas de fausses alarmes, elles deviennent des actions conditionnelles minimales (marqués en gras).

Fiabilité système d'observation	Actions maintenance	C. parfait	C. minimal	S. parfait	S. imparfait	Con. parfait	Con. imparfait	Con. minimal
Fausse alarme	C. parfait	100	0	0	0	0	0	0
Fausse alarme	C. minimal	0	100	0	0	0	0	0
Fausse alarme	S. parfait	0	0	100	0	0	0	0
Fausse alarme	S. imparfait	0	0	0	100	0	0	0
Fausse alarme	Con. Parfait	0	0	0	0	0	0	100
Fausse alarme	Con. Imparfait	0	0	0	0	0	0	100
Fausse alarme	Con. minimal	0	0	0	0	0	0	100
Non-détection	C. parfait	100	0	0	0	0	0	0
Non-détection	C. minimal	0	100	0	0	0	0	0
Non-détection	S. parfait	0	0	100	0	0	0	0
Non-détection	S. imparfait	0	0	0	100	0	0	0
Non-détection	Con. parfait	100	0	0	0	0	0	0
Non-détection	Con. imparfait	100	0	0	0	0	0	0
Non-détection	Con. minimal	100	0	0	0	0	0	0
Détection	C. parfait	100	0	0	0	0	0	0
Détection	C. minimal	0	100	0	0	0	0	0
Détection	S. parfait	0	0	100	0	0	0	0
Détection	S. imparfait	0	0	0	100	0	0	0
Détection	Con. parfait	0	0	0	0	100	0	0
Détection	Con. imparfait	0	0	0	0	0	100	0
Détection	Con. minimal	0	0	0	0	0	0	100

Tableau 12. TPC du nœud « actions de maintenance modifiées »

d. Quantification du motif « Efficacité de la logistique »

- **Nœuds sur la disponibilité des ressources : « Pièces de rechanges et outils »**

Sur les nœuds « disponibilité des outils/ pièces de rechanges/ matériels consommables... » nous étudions un attribut des ressources qui est leur disponibilité. Cet attribut a deux modalités : disponible et non-disponible. L'information pour définir les TPC provient d'une analyse des historiques sur les ruptures de stock.

- **Nœud « Personnel (disponibilité) »**

Sur le nœud « disponibilité du personnel » nous étudions deux modalités (P = {disponible, non-disponible}).

Dans la phase d'opération, l'information pour définir les TPC provient du programme de maintenance. Sur le programme sont spécifiées les heures-hommes (H-H) prévues pour la maintenance préventive et corrective (temps total programmé). Puis les temps réels (actions programmées effectuées) passés en activités préventives et les temps programmés dans la GMAO peuvent être comparés aux temps prévus dans le programme. La différence entre le total des heures programmées et total des heures programmées effectuées sur le total des heures programmées définit la probabilité d'indisponibilité du personnel (Figure 53). Pour cela il faut considérer seulement le temps hors service en relation avec les activités du personnel.

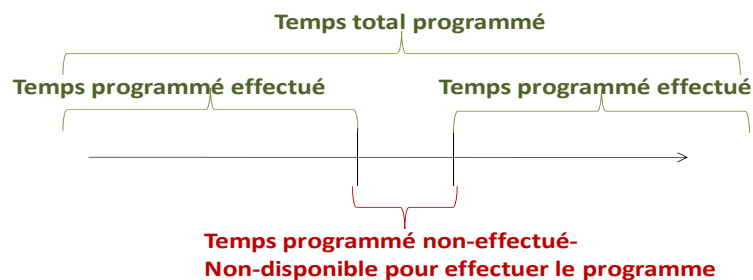


Figure 53. Temps non-disponible pour la réalisation du programme de maintenance

Pour les H-H dépensées dans la tâche selon le programme, nous considérons que :

H-H dépensées dans la tâche selon le programme \leq H-H programmées.

Les H-H dépensées dans la tâche selon le programme seront au maximum égale au H-H programmées. De cette façon nous considérons que si le personnel dépasse le temps programmé, il sera indisponible pour une autre activité. Par exemple, il y a des tâches préventives qui peuvent avoir zéro heure-homme dépensée c'est-à-dire elles n'ont pas pu être effectuées (par exemple, à cause d'autres interventions plus urgentes). Avec ces données nous pouvons estimer l'indisponibilité du personnel. Nous utilisons la formule suivante:

$$P(\text{personnel} = \text{indisponible}) = \frac{X_{H-H \text{ prog}} - X_{H-H \text{ prog_ef}}}{X_{H-H \text{ prog}}} \quad (20)$$

Où :

$X_{H-H\ prog}$: Nombre des H-H programmées

$X_{H-H\ prog_ef}$: Nombre des H-H programmées effectuées selon le programme

Dans la phase de conception, l'information provient du benchmarking avec des entreprises dans des secteurs similaires en comparant les heures définies dans le plan de maintenance, les heures de disponibilité du personnel et le ratio d'indisponibilité (IEC 60300-3-14, 2004).

- **Nœud « Efficacité de la logistique de maintenance »**

Ce nœud contient deux états « Efficacité de la logistique de maintenance » = {efficace, non-efficace}. Nous utilisons une agrégation par un ET LOGIQUE puisque la logistique est efficace que s'il y a une disponibilité matérielle et humaine simultanément.

e. **Quantification du motif « Efficacité du collectif de travail »**

- **Nœud « Efficacité du collectif de travail et de l'organisation de la maintenance »**

Pour estimer comment les FOPs peuvent dégrader les performances des actions ainsi que l'efficacité du collectif de travail, nous proposons d'utiliser la méthode d'aggravation par facteur de dégradation, c'est-à-dire que la probabilité de l'état non dégradé d'une variable est fonction de l'influence spécifique de l'état dégradé de chacun de ses parents ainsi que l'impact de chaque parent. Cette méthode a déjà été validée et exploitée par EDF et l'INERIS dans les travaux (Léger, 2009). Nous proposons de l'adapter à notre problème en cohérence avec les études menées précédemment.

Pour (Léger, 2009), les facteurs organisationnels ont deux modalités : absent et présent. Ils sont des variables racines et leur présence est quantifiée par les jugements d'experts. Alors il peut s'agir d'une distribution uniforme lorsqu'il y a de l'incertitude sur l'état des variables ou d'une distribution spécifique lorsqu'il existe une certaine connaissance a priori (Léger, 2009).

La présence de l'un de ces facteurs dégrade les phases d'action du personnel et en conséquence la performance du personnel (Figure 54). Celle-ci dégrade l'état du composant. Les portes de type « Noisy Or » et « Noisy-And » sont utilisées pour supporter cette modélisation. Ces portes permettent de calculer l'effet des variables « causes » ou parents vers de variables « effets » ou filles (variable cible). Ces portes permettent d'intégrer l'effet cumulatif ou aggravant sur la variable fille (effet) lorsque plusieurs causes produisant la dégradation sont présentes. De plus, elles permettent de réduire le nombre de paramètres alors lorsque le nombre de parents augmente le nombre de paramètres de la variable fille augmente d'une façon proportionnelle. Pour cela, la méthode fait l'hypothèse d'indépendance entre les « causes » de la variable cible.

De cette façon, le « noisy-or » est défini comme soit Y une variable, et $X = X_i$ l'ensemble des parents de Y (avec $i = 1, 2, 3, \dots, n$). On définit par :

- \bar{y} , la modalité non dégradée de la variable Y (et par y , sa modalité dégradée).
- \bar{x}_i , la modalité non dégradée du parent X_i
- $X_k \subseteq X$, le sous-ensemble des parents de Y qui sont dans un état dégradé.

- $\alpha_{i-Y} \in [0,1]$, l'influence de l'état dégradé du parent X_i sur l'état non dégradé de la variable Y .

Lorsque l'étude traite les facteurs organisationnels et humains, il est possible d'ignorer ou de trouver l'incertitude sur les variables modélisées. Pour cette raison, il est raisonnable de considérer que lorsque les variables filles sont dans un état non-dégradé, il existe une probabilité $a_0 \in [0,1]$ « leak » que la variable fille soit dans un état dégradé à cause de l'ensemble des causes qui ne sont pas directement modélisées due à l'incertitude liée aux analyses organisationnelles et humaines (Jensen, 1996).

Les portes « Leaky Noisy OR » et « Leaky Noisy AND » supportent cette notion. Avec ces portes, si tous les parents se trouvent en état non-dégradé alors il existe une probabilité pour que la variable fille soit dans un état dégradé. La probabilité initiale pour un « Leaky Noisy Or » est définie comme :

$$P(\bar{y} / \bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) = a_0 \text{ avec } a_0 \in [0,1], \tag{21}$$

La probabilité de l'état non dégradé de la variable Y , sachant l'état dégradé du $i^{\text{ème}}$ parent, se définit de la manière suivante (Jensen, 1996) :

$$p_i = P(\bar{y} / \bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n) = a_0 * \alpha_{i-Y} \text{ avec } \alpha_{i-Y} \in [0,1] \tag{22}$$

Sur le logiciel support de RB, BayesiaLab de la société Bayesia (logiciel que nous utilisons dans ces travaux), la fonction « Noisy or » est intégrée. Pour ce motif cette fonction est appliquée comme :

NoisyOr(?Performance du collectif de travail?, ?Préparer?, α_1 , ?Réaliser?, α_2 , ?Clôturer?, α_3).

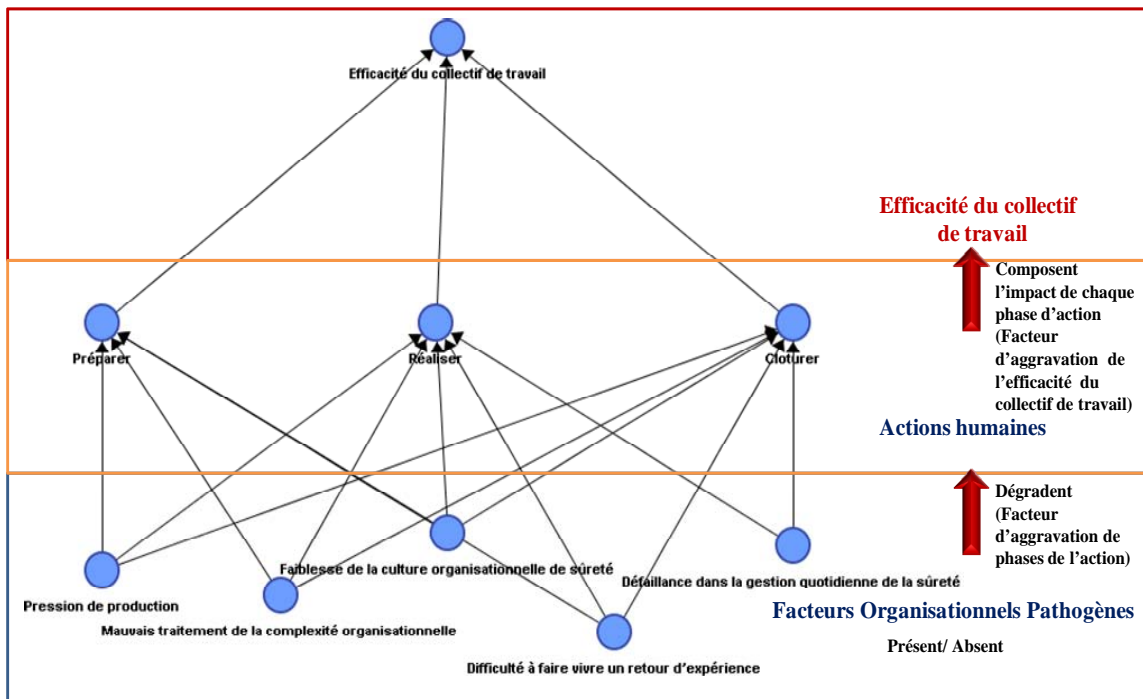


Figure 54. Facteurs d'aggravation liés au motif « efficacité du collectif du travail »

Comme défini par (Lèger, 2009), la grille exprimant les niveaux ou les modalités pour estimer les facteurs d'aggravation α_i est présentée sur le Tableau 13.

Modalités	α_i
Pas d'impact	100
Faible impact	95
Impact moyen	75
Impact important	50
Impact fort	1

Tableau 13. Grille pour estimer les facteurs d'aggravation α_i

f. Quantification des facteurs exogènes : facteurs environnementaux

- **Nœud « Environnement »**

Pour caractériser les facteurs environnementaux, deux modalités « globales » peuvent être utilisées selon « environnement » = {conditions nominales, conditions non- nominales}.

g. Quantification de l'état du composant: sa disponibilité

- **Nœud « Disponibilité_initiale »**

Le nœud disponibilité_initiale contient l'état du composant soumis à un plan de maintenance avec des actions préventives et correctives avec différentes efficacités. L'efficacité du plan de maintenance représente le degré de restauration des actions de maintenance d'un composant et fait référence à l'efficacité prévue dans le plan de maintenance. Les actions de maintenance correctives peuvent être minimales (si une pièce mineure de l'équipement est remplacée pour que celui-ci revienne dans un état de fonctionnement) ou parfaites (pour les remplacements intégraux des composants) et les actions de maintenance préventives peuvent être parfaites, minimales ou imparfaites dans les cas où l'état du système n'est ni comme neuf ni comme avant la défaillance (ceci montre les bénéfices de la maintenance préventive).

Pour représenter les effets des différents types d'actions sur l'état du composant il est nécessaire de s'appuyer sur des processus stochastiques. Les processus les mieux adaptés à chaque type d'efficacité sont (Yanez et al., 2002) (Rigdon et Basu, 2000) :

- Pour la maintenance parfaite : le processus de renouvellement sachant qu'il fait l'hypothèse de temps entre défaillances indépendants. Le temps d'opération précédent t_n a donc plus d'effet sur le temps d'opération future t_{n+1} (Nakagawa, 2005).
- Pour la maintenance minimale : le processus non-homogène de Poisson. Ce processus suppose des temps entre défaillances dépendants. En conséquence lors d'une action minimale, la durée de vie du composant reste égale à celle précédant l'intervention.
- Pour la maintenance imparfaite : l'efficacité imparfaite est modélisée comme une intervention située entre ces deux extrêmes (minimale et parfaite). Pour modéliser son impact sur le composant tel que proposé par (Pham et Wang, 1996) (Doyen et

Gaudoin, 2004), nous considérons qu'elle a un effet parfait avec une probabilité « p » et un effet minimal avec une probabilité « q » (q= 1-p).

En conséquence pour calculer la probabilité conditionnelle d'être disponible avec chaque type d'action (i.e. P(X=Disponible/Y=corrective totale)) il faut intégrer les différents types de processus stochastiques. En nous basant sur ces processus, nous proposons une procédure de calcul de la probabilité conditionnelle pour chaque type de maintenance avec une efficacité donnée. Cette procédure est détaillée dans l'annexe 2.

En résumé sur la quantification de ce nœud, sa TPC est définie dans le Tableau 14. Cette procédure permet d'obtenir la disponibilité moyenne lorsqu'un type de stratégie est appliqué.

Actions de maintenance	Disponible	Non-disponible
Corrective parfaite	$A_{PARCOR} = 1 - \bar{A}_{PARCOR}$	$\bar{A}_{PARCORR} = \frac{MDT_{PARCOR}}{MTBF_{PARCOR}}$
Corrective minimale	$A_{MINCOR} = 1 - \bar{A}_{MINCOR}$	$\bar{A}_{MINCOR} = \frac{MDT_{MINCOR}}{MTBF_{MINCOR}}$
Systématique minimale	$A_{MINSYS} = 1 - \bar{A}_{MINSYS}$	$\bar{A}_{MINSYS} = \frac{\frac{MUT_{MINSYS}}{T_{MINSYS}} \times MDT_{MINSYS} + MDT_{PARCOR}}{MTBF_{MINSYS}}$
Systématique parfaite	$A_{PARSYS} = 1 - \bar{A}_{PARSYS}$	$\bar{A}_{PARSYS} = \frac{B}{\left[R(T_p) \times T_p + \int_0^{T_p} R(t) \times F(T_p) \right] + B}$ $B = R(T_p) \times MDT_{PARSYT} + (1 - R(T_p)) \times MDT_{PARCOR}$
Systématique imparfaite	$A_{IMPSYS} = 1 - \bar{A}_{IMPSYS}$	$\bar{A}_{IMPSYS} = \frac{\frac{MUT_{IMPSYS}}{T_{IMPSYS}} \times MDT_{IMPSYS} + MDT_{PARCOR}}{MTBF_{IMPSYS}}$
Conditionnelle parfaite	$A_{PARCOND} = 1 - \bar{A}_{PARCOND}$	$\bar{A}_{PARCOND} = \frac{\frac{MUT_{PARCOND}}{T_{COND}} \times MDT_{PARCOND}}{MTBF_{PARCOND}}$
Conditionnelle imparfaite	$A_{IMPARCOND} = 1 - \bar{A}_{IMPARCOND}$	$\bar{A}_{IMPARCOND} = \frac{\frac{MUT_{IMPARCOND}}{T_{IMPARCOND}} \times MDT_{IMPARCOND} + MDT_{PARCOND}}{MTBF_{IMPARCOND}}$
Conditionnelle minimale	$A_{MINCOND} = 1 - \bar{A}_{MINCOND}$	$\bar{A}_{MINCOND} = \frac{\frac{MUT_{MINCOND}}{T_{COND}} \times MDT_{MINCOND} + MDT_{PARCOND}}{MTBF_{MINCOND}}$

Tableau 14. TPC du nœud « disponibilité initiale »

Où :

A_{MINCOR} : Disponibilité obtenue suite à des actions correctives minimales.

A_{PARCOR} : Disponibilité obtenue suite à des actions correctives parfaites.

A_{MINSYS} : Disponibilité obtenue suite à des actions systématiques minimales.

A_{PARSYS} : Disponibilité obtenue suite à des actions systématiques parfaites.

$A_{IMPARSYS}$: Disponibilité obtenue suite à des actions systématiques imparfaites.

$A_{PARCOND}$: Disponibilité obtenue suite à des actions conditionnelles parfaites.

$A_{IMPARCOND}$: Disponibilité obtenue suite à des actions conditionnelles imparfaites.

$A_{MINCOND}$: Disponibilité obtenue suite à des actions conditionnelles minimales.

MUT_{PARCOR} , MDT_{PARCOR} , $MTBF_{PARCOR}$ correspondent respectivement au temps moyen de bon fonctionnement suite à une action corrective parfaite, temps moyen hors service suite à une action corrective parfaite et temps moyen entre défaillances suite à une action corrective parfaite respectivement.

MUT_{MINCOR} , MDT_{MINCOR} , $MTBF_{MINCOR}$ correspondent respectivement au temps moyen de bon fonctionnement suite à une action corrective minimale, temps moyen hors service suite à une action corrective minimale et temps moyen entre défaillances suite à une action corrective minimale respectivement.

$MUT_{MINSYST}$, $MDT_{MINSYST}$, $MTBF_{MINSYST}$ correspondent respectivement au temps moyen de bon fonctionnement suite à une action systématique minimale, temps moyen hors service suite à une action systématique minimale et temps moyen entre défaillances suite à une action systématique minimale respectivement.

$MUT_{PARSYST}$, $MDT_{PARSYST}$, $MTBF_{PARSYST}$ correspondent respectivement au temps moyen de bon fonctionnement suite à une action systématique parfaite, temps moyen hors service suite à une action systématique parfaite et temps moyen entre défaillances suite à une action systématique parfaite respectivement.

$MUT_{IMPARSYS}$, $MDT_{IMPARSYS}$, $MTBF_{IMPARSYS}$ correspondent respectivement au temps moyen de bon fonctionnement suite à une action préventive imparfaite, temps moyen hors service suite à une action préventive imparfaite et temps moyen entre défaillances suite à une action préventive imparfaite respectivement.

$MUT_{PARCOND}$, $MDT_{PARCOND}$, $MTBF_{PARCOND}$ correspondent respectivement au temps moyen de bon fonctionnement suite à une action conditionnelle parfaite, temps moyen hors service suite à une action conditionnelle parfaite et temps moyen entre défaillances suite à une action conditionnelle parfaite respectivement.

$MUT_{IMPARCOND}$, $MDT_{IMPARCOND}$, $MTBF_{IMPARCOND}$ correspondent respectivement au temps moyen de bon fonctionnement suite à une action conditionnelle imparfaite, temps moyen hors service suite à une action conditionnelle imparfaite et temps moyen entre défaillances suite à une action conditionnelle imparfaite respectivement.

$MUT_{MINCOND}$, $MDT_{MINCOND}$, $MTBF_{MINCOND}$ correspondent respectivement au temps moyen de bon fonctionnement suite à une action conditionnelle minimale, temps moyen hors service suite à une action conditionnelle minimale et temps moyen entre défaillances suite à une action conditionnelle minimale.

Cette procédure tient en compte des différents scénarios comme, par exemple, la probabilité d’arriver à réaliser la maintenance systématique à un instant T_p ou de tomber en défaillance avant de réaliser l’intervention préventive. Elle considère également que lorsqu’une stratégie conditionnelle/prévisionnelle est bien réalisée, le composant ne devrait pas tomber en panne. Dans ce cas l’indisponibilité associée est liée au nombre d’interventions durant sa période de vie utile ($\frac{MUT_{PARCOND}}{T_{PARCOND}} \times MDT_{PARCOND}$).

Les propositions énoncées dans ce chapitre permettent d’illustrer une démarche pour la quantification des paramètres en calculant la disponibilité moyenne à partir d’un calcul simple et applicable sans un grand investissement dans la modélisation. Toutefois d’autres méthodes peuvent être utilisés et intégrées à notre démarche en fonction des hypothèses posées.

- **Nœud « Disponibilité modifiée »**

L’efficacité de la logistique est indispensable pour la réalisation des tâches. Ce nœud a deux états : efficace ou non-efficace et si la logistique est efficace, nous obtenons une disponibilité maximale qui est celle prévue avec la mise en œuvre du plan de maintenance. Si la logistique est dégradée, elle va alors dégrader l’état de fonctionnement du composant vers l’état ‘Hors service’ puisque l’inefficacité de la logistique produit des retards en maintenance qui affectent le temps en état hors service et augmentent l’indisponibilité.

Sur ce nœud nous réalisons une agrégation à l’aide d’un ET logique puisqu’une action de maintenance ne peut être réalisée dans les délais que si l’ensemble des besoins (matériels) est disponible (Tableau 15).

Disponibilité initiale	Efficacité logistique maintenance	Disponible	Non-disponible
Disponible	Efficace	100	0
Disponible	Non efficace	0	100
Non-disponible	Efficace	0	100
Non-disponible	Non efficace	0	100

Tableau 15. TPC du nœud « Disponibilité modifiée »

De cette façon, la règle sémantique exprimée du chapitre 2 est prise en compte : la non-efficacité de la logistique, causée par l’indisponibilité de pièces de rechanges ou du personnel, augmente le MDT et donc diminue la disponibilité du composant.

- **Nœud « Disponibilité_opérationnelle»**

L'efficacité du personnel est aussi indispensable pour la réalisation des tâches. De façon similaire, nous réalisons une agrégation par un ET logique puisqu'une action de maintenance ne peut être réalisée dans les délais que si l'ensemble des besoins humains est disponible.

Nous observons que la non-efficacité du personnel diminue la disponibilité du composant, soit par la diminution du MUT à travers une mauvaise réparation par exemple, soit en augmentant le MDT à cause de l'incapacité du personnel à réparer le composant (e.g. dû à un manque de formation).

- **Nœud « Disponibilité_environnée »**

Les facteurs environnementaux impactent uniquement la vitesse du mécanisme de dégradation, et impactent le MUT. Ils existent aussi deux cas :

- Conditions nominales : puisque les conditions se trouvent dans les conditions normales définies en conception, les conditions n'affectent pas l'état du composant.
- Conditions non-nominales : puisque les conditions sont plus sévères que les conditions normales définies en conception, un facteur d'aggravation du composant β ($0 \leq \beta < 100$) est ajouté. Comme nous utilisons un modèle statique, nous faisons l'hypothèse que β est une valeur moyenne représentative des conditions non-nominales dans une période de temps t .

La TPC est définie selon le Tableau 16 ci-dessous :

Disponibilité.Opérationnelle	Environnement	Disponible	Non disponible
Disponible	Nominale	100	0
Disponible	Non-nominale	β	$100 - \beta$
Non disponible	Nominale	0	100
Non disponible	Non-nominale	0	100

Tableau 16. TPC du nœud « Disponibilité environnée »

De cette manière les conditions environnementales non-nominales causent une diminution du MUT du composant et donc de sa disponibilité (règle sémantique exprimée au chapitre 2).

L'utilisation de différentes méthodes proposées dans ce chapitre permet d'obtenir une approximation de la disponibilité moyenne. Lorsque les motifs sont paramétrés, il est possible de les instancier et de les unifier dans un modèle global. Cette unification permet de quantifier l'impact des différentes variables de diverses natures sur les performances du SP et SM, comme par exemple l'impact d'une variable qualitative (e.g. l'efficacité du collectif de travail) sur une variable plus quantitative (e.g. la disponibilité du composant). Ainsi il est possible de comparer, en terme probabilistes, l'impact des différentes stratégies de maintenance sur les différentes performances du SM et du SP comme la disponibilité du SP, la réussite de sa mission ou la qualité produite.

4.3. Conclusion

Nous avons proposé dans ce chapitre des procédures pour définir les probabilités conditionnelles à utiliser au sein de motifs génériques à base de PRM. Pour l'obtention des paramètres probabilistes de motifs plus techniques comme le motif du « plan de maintenance » et de « l'efficacité de la logistique », nous utilisons des connaissances de nature plus « objective » issue des retours d'expérience. Pour obtenir ces probabilités, nous proposons un ensemble de méthodes permettant le traitement des données issues de la GMAO. Comme il existe d'autres motifs plus qualitatifs comme « l'efficacité du collectif de travail » donc difficilement quantifiables à travers l'analyse des données, nous proposons d'utiliser les jugements d'experts pour déterminer une partie de ces paramètres.

L'ensemble de ces propositions est cependant basé sur de la connaissance « terrain » (entre autres issue de SKOOB) ce qui devrait faciliter l'application de notre approche sur un cas industriel réel. Toutefois l'ensemble des méthodes de quantification des paramètres ne se limitent pas à celles présentées dans ce chapitre. D'autres méthodes sont à investiguer en termes de perspectives.

Tous les éléments du modèle global exécutable ayant été étudiés et traités à travers les chapitres 2, 3 et 4, il est nécessaire à ce stade de montrer l'applicabilité de l'ensemble de la démarche sur un cas industriel. Ceci fait l'objet du chapitre 5 (Figure 18 -Point D). Ce cas applicatif porte sur un processus de fabrication de ferment où il y a de fortes contraintes au niveau de la sécurité sanitaire des produits. Cette mise en application vise à montrer la faisabilité de la démarche sur un cas industriel en illustrant le passage à l'échelle du modèle (pour faire face à la complexité) et sur la valeur ajoutée lors de l'utilisation du modèle pour évaluer les stratégies de maintenance.

Chapitre 5

Application de la méthodologie à un système industriel de production de ferments

5.1. Introduction

Dans les chapitres précédents nous avons proposé une méthodologie pour l'élaboration d'un modèle global exécutable support à l'aide à la décision en maintenance en permettant d'évaluer, par simulation, différentes stratégies. Ce modèle est construit à partir de motifs génériques qui sont ensuite à instancier à la contextualisation de l'application (Figure 18 -Point D).

Ces motifs vont s'interconnecter les uns aux autres grâce aux variables en entrée et sortie de ces motifs et vont permettre, après quelques ajustements spécifiques liés à l'application, de calculer les différentes variables décisionnelles sur lesquelles sont basées les évaluations (calculs des KPIs).

Pour montrer la faisabilité de cette méthodologie sur un passage à l'échelle (et ses limites) mais aussi sa potentielle valeur ajoutée (pertinence, intérêt) nous proposons dans ce chapitre de déployer la méthodologie sur un cas industriel.

Pour des raisons de confidentialité, l'industriel ne sera pas nommé et les données utilisées ne sont pas les vraies données (dans l'absolu) mais elles respectent les ordres de grandeur de la réalité. Cependant l'industriel (tiers personne) a pris une part importante au déploiement des scénarios tests donc à la phase de validation.

Ce cas industriel est un processus de production de ferments considéré comme un système complexe (grande taille, multi-composants, interactions entre composants, acteurs aux niveaux technique, humain et organisationnel dans le SM) avec des fortes contraintes hygiénique.

De cette façon nous expliquons comment sont déployées les différentes phases proposées dans la méthodologie à ce cas d'étude : (1) la formalisation des connaissances multipoints de vue sur le système de production de ferment et son SM (i.e. phase d'instanciation des modèles de connaissances métiers du SP et du SM), (2) l'unification des connaissances à travers la particularisation de motifs génériques et finalement (3) le paramétrage de ces motifs.

Le modèle final (après passage Skool) issu de la méthodologie est supporté par l'outil Bayesialab. Il nous permet de réaliser des simulations à partir de différents scénarios et d'évaluer, en termes probabilistes, quels sont les meilleurs choix au niveau des stratégies de maintenance en fonction des paramètres de sûreté des composants du SP, du plan de maintenance envisagé ainsi que des ressources et de l'efficacité du personnel pour la maintenance. Dans un objectif de validation du modèle, quatre scénarios de simulation sont proposés : les deux premiers proposent d'évaluer différents types de stratégies de maintenance et les deux derniers prennent en compte l'impact des autres variables associées à un plan de maintenance (comme la logistique et l'efficacité du

collectif de travail) sur les performances du SP et du SM. En fin de ce chapitre, une discussion est développée relative à la teneur des résultats obtenus par rapport à ces différentes simulations.

5.2. Présentation du SP : une ligne de fermentation

Le système choisi pour l'expérimentation est une ligne de production de ferments réelle. Pour des raisons de confidentialité, nous ne donnons pas d'informations sur l'industriel dans ce document. Dans ce type de processus l'un des besoins consiste à élaborer et valider les stratégies de prévention et de réduction des risques microbiologiques potentiellement associés au produit.

Pour éviter ces risques, des stratégies de maintenance doivent être mises en place afin de maîtriser la dégradation des composants critiques ainsi que des possibles fuites dans le processus qui peuvent polluer la production. Ces stratégies peuvent donc être réétudiées dans le cas où elles ne sont pas satisfaisantes pour atteindre les exigences de performances fixées par les réglementations de sécurité sanitaire ainsi que de production.

Cette ligne de production de ferments est constituée principalement par une cuve et une ligne de chargement. Le schéma de structure (Figure 55) montre le système à étudier (cette schématisation est propre à l'entreprise et ne correspond à aucune normalisation graphique).

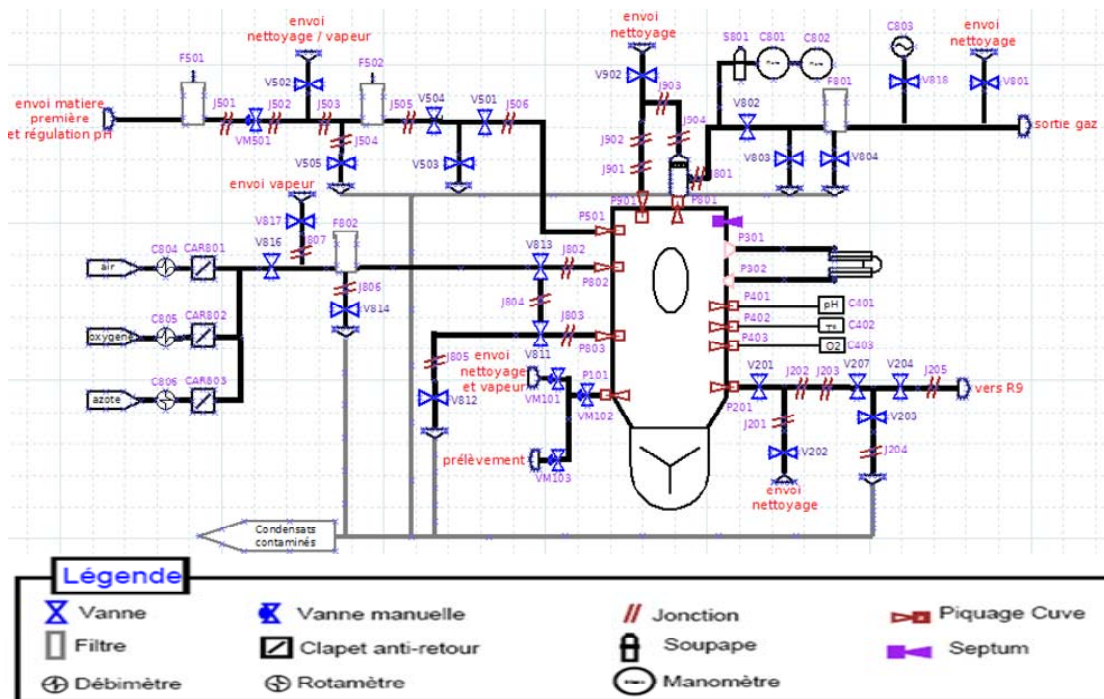


Figure 55. Schéma de structure de la ligne de production de ferment

Notre SP est assimilé au système de transformation qui a comme entrée un milieu inoculé et comme sortie des ferments. Le processus de production de ferment se fait de manière cyclique et il est constitué d'une phase de stérilisation du système afin de garantir les conditions d'hygiène nécessaires pour la production, une phase de culture (production du ferment) et une phase de nettoyage (Figure 56).

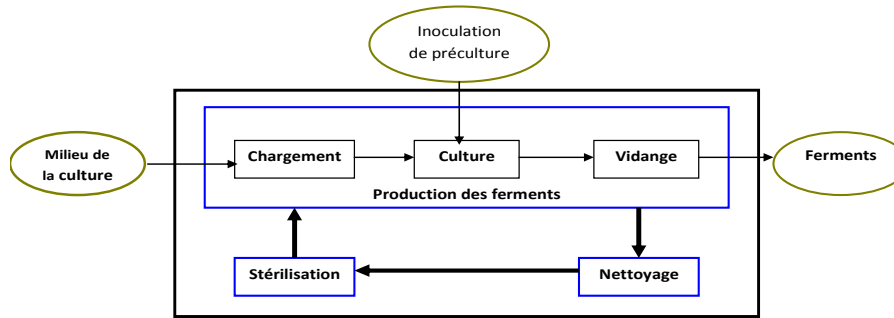


Figure 56. Trois fonctions principales du système de production de ferment

Ce processus est presque totalement automatisé et il est constitué de différents composants de divers natures : pneumatiques, électriques, mécaniques... En conséquence, pour établir des stratégies de maintenance de ce SP, il existe différents facteurs à prendre en compte : les dépendances entre les composants, les interactions entre les composants (aspect technique), leurs différents rythmes de sollicitations et donc leurs différentes vitesses de dégradation mais également d'autres éléments comme les interactions entre les composants et les opérateurs de maintenance. Ces aspects sont caractéristiques de la complexité du système.

Nous proposons donc de particulariser les différents points de vue de ce SP et d'utiliser les motifs génériques de modélisation de la maintenance et de son organisation pour créer un modèle global du SP et de son SM afin d'estimer les performances dans une phase de re-conception du SM. Cette démarche permet la capitalisation de connaissances et la réutilisation de modèles avec l'objectif de mettre en place des principes de précaution pour atteindre les objectifs de la réglementation au niveau hygiénique.

5.3. Formalisation des connaissances du système de production de ferment

5.3.1. Vue fonctionnelle du SP

Pour étudier le fonctionnement du système de production, nous nous appuyons sur une analyse fonctionnelle afin de montrer les interactions entre les différentes fonctions à travers les échanges des flux et la décomposition de fonctions en différents niveaux d'abstraction. La Figure 56 illustre les trois phases principales du système. La première phase consiste à stériliser les équipements, puis à réaliser des tests d'étanchéité afin d'éviter toutes contaminations possibles avant la culture. La seconde phase est la phase de production du ferment proprement dite, où le chargement des ingrédients gazeux et liquides est réalisé de manière stérile. La ligne de chargement est aussi utilisée en cours de culture à des fins de régulation du milieu pour la fermentation. Une fois cette phase terminée, la vidange et le nettoyage des équipements sont réalisés.

Dans la suite nous traiterons uniquement la fonction « produire un ferment » sachant que les autres fonctions (et leurs interactions) pourraient être modélisées de la même façon (mêmes mécanismes de modélisation). L'objectif principal de cette fonction retenue est de produire des ferments. Pour cela, le système de production consomme un ensemble de flux entrants : l'énergie électrique, un milieu de culture, une pré-culture, des régulateurs et des gaz (Figure 57). Le flux SF

n'a pas été rajouté car nous considérons qu'il n'a pas un impact important dans la phase d'évaluation de stratégies de maintenance.

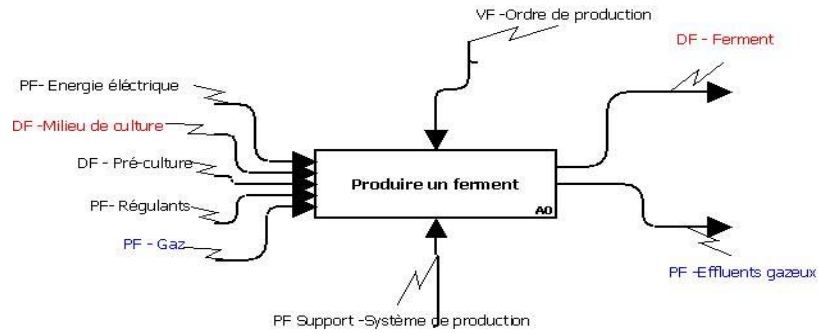


Figure 57. Fonction « produire ferment » au niveau A-0

Pour l'étude de cette fonction, nous proposons sa décomposition en différents niveaux d'abstraction jusqu'aux fonctions élémentaires. Cette décomposition est montrée sur la Figure 58.

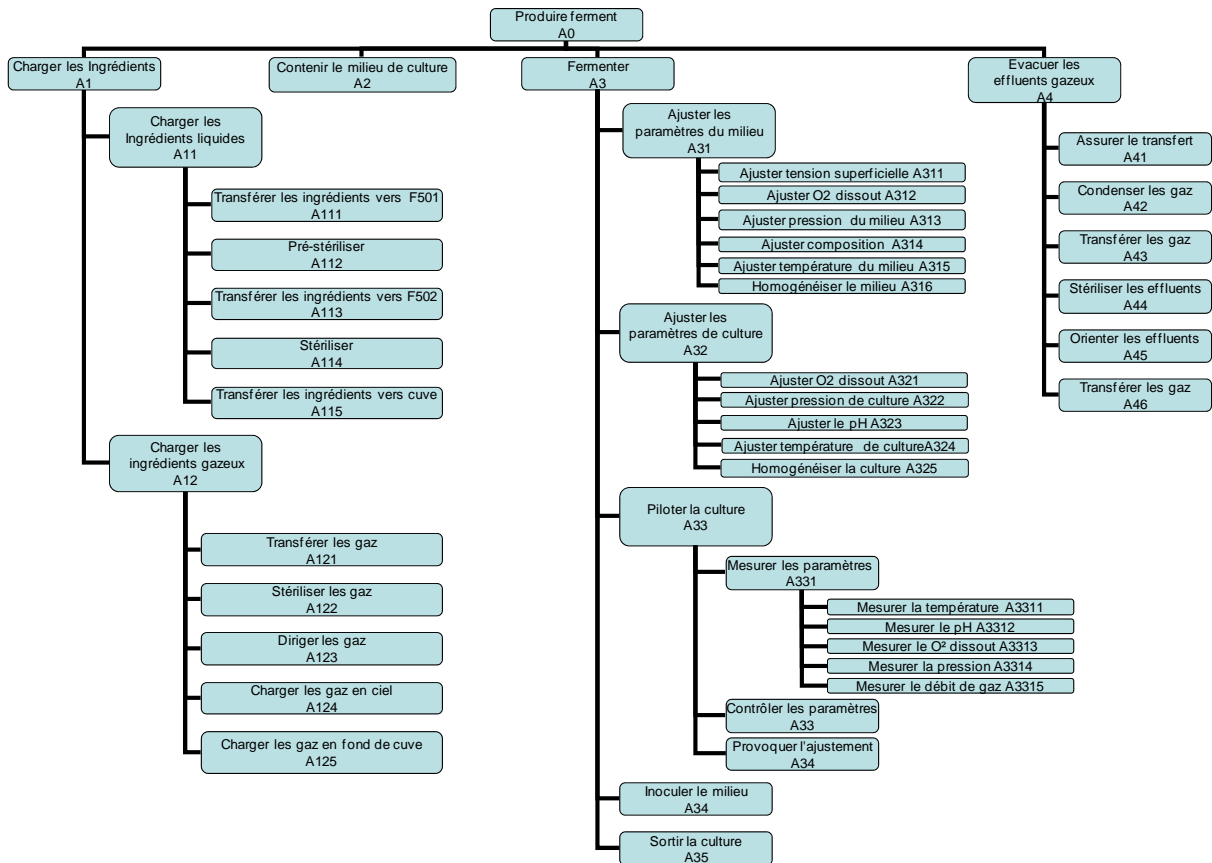


Figure 58. Arborescence de la décomposition fonctionnelle du système de production de ferment

Ainsi, la phase de production du ferment est décomposée en quatre fonctions (Figure 59) : charger les ingrédients (A1), contenir le milieu de culture (A2), fermenter (A3) et évacuer les effluents gazeux (A4).

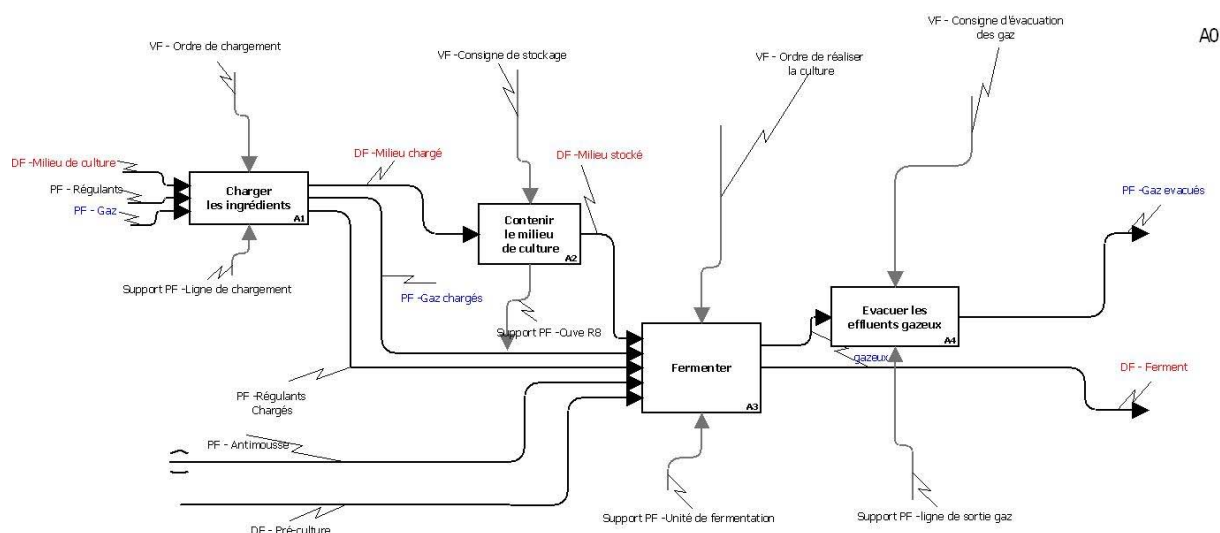


Figure 59. Sous-fonctions du système de production de ferment

Ces quatre fonctions se décrivent de la façon suivante :

- Charger les ingrédients (fonction A1) : Cette fonction permet d'introduire certains éléments (milieu de culture, régulateurs, gaz) nécessaires pour la préparation du milieu utilisé pour la fermentation. Le chargement d'ingrédients se réalise plus spécifiquement de la façon suivante :
 - o Les ingrédients liquides passent par un sous-système « ligne de chargement » (fonction A11) composé principalement de vannes automatiques ou manuelles qui régulent le débit, de joints qui garantissent l'étanchéité de la ligne évitant la pollution du ferment et de filtres qui éliminent toute impureté permettant la stérilisation des ingrédients. Ces ingrédients liquides sont envoyés à la cuve où ils seront mis en contact avec la pré-culture.
 - o Ensuite le gaz est chargé (fonction A12). Dans cette fonction, différentes mesures sont réalisées avant d'introduire le gaz dans la cuve : les débits en air, oxygène et azote sont enregistrés grâce aux débitmètres C804, C805 et C806. Ce gaz est filtré afin de le purifier et ensuite dirigé vers l'unité de fermentation où il va se mettre au contact des ingrédients liquides.
- Contenir le milieu de culture (fonction A2) : une fois que les ingrédients liquides et gazeux sont chargés dans la cuve, ils sont stockés afin de créer un milieu adapté pour le processus de fermentation.
- Fermenter (fonction A3) : Pendant cette étape du processus, la fermentation est réalisée. Pour cela, il est nécessaire d'ajuster certains paramètres (fonction A31) :
 - o Ajuster la tension superficielle : réalisée via le septum (fonction A311). Cet ajustement est nécessaire pour diminuer la quantité de mousse et éviter que cette mousse soit évacuée avec le gaz et reste dans la ligne d'évacuation des gaz.
 - o Ajuster l'O₂ dissout : consiste à faire varier la valeur du débit d'O₂ pour assurer la régulation de celui-ci dans le milieu afin de créer des conditions idéales pour la

prolifération de bactéries aérobiques (fonction A312). Les ajustements et le contrôle de paramètres sont automatisés (fonction A33) en utilisant des sondes ou des débitmètres qui permettent de mesurer différents paramètres comme la température, le débit, le pH, le contenu d'O₂... (fonction A331).

- Ajuster la pression : permet de réguler la pression du fermenteur (fonction A313).
 - Ajuster la composition : consiste à transférer les régulateurs vers le milieu pressurisé (fonction A314).
 - Ajuster la température : A l'aide de l'échangeur thermique la régulation de la température de la culture est effectuée par la circulation de liquide entre une double paroi à des températures chaudes (vapeur) ou froides (eau glacée) selon les besoins (fonction A315).
 - Homogénéiser le contenu : lorsque l'ajustement de certains paramètres du milieu est réalisé, l'unité d'agitation se met en route afin de mélanger le contenu de la cuve et de mettre le milieu en condition (fonction A316).
 - Inoculer la pré-culture : la pré-culture (bactéries) est introduite, le processus de fermentation commence (fonction A34).
 - Ajuster l'O₂ dissout : une fois la pré-culture introduite, le niveau d'O₂ est régulé (fonction A321) afin de garantir des conditions pour la fermentation ainsi que pour l'ajustement de la pression.
 - Ajuster la pression : permet de gérer la pression du fermenteur (fonction A322).
 - Ajuster le pH : durant cette étape, des régulateurs sont injectés pour réguler le pH (fonction A323).
 - Ajuster la température : de façon similaire à la fonction A315 la température du milieu est ajustée grâce à l'échangeur thermique (fonction A324).
 - Homogénéiser le contenu : le mélange du milieu est fait grâce à l'unité d'agitation (fonction A325).
 - Lorsque la préparation du ferment est terminée, il est transféré. Il représente notre produit fini (fonction A35).
- Evacuer les effluents gazeux (fonction A4) : une fois que la production est finie, les gaz résiduels sont éjectés afin de laisser la cuve vide et disponible pour le nettoyage et une nouvelle phase de stérilisation des équipements pour la production d'autres ferments.

Cette analyse de fonctions permet principalement d'identifier les supports aux fonctions élémentaires. Ces supports (ou composants) sont les éléments qui seront directement concernés par les actions de maintenance.

Une fois spécifiées les fonctions du processus de production, nous étudions les propriétés les plus importantes de chaque flux.

5.3.2. Vue informationnelle du SP

Le point de vue informationnel permet d'identifier les propriétés ou attributs des flux. Pour illustrer cette vue sur notre exemple, nous nous appuyons sur les flux définis dans l'analyse fonctionnelle. L'objectif de la vue informationnelle est d'étudier les propriétés nécessaires à satisfaire chaque flux afin de considérer que la fonction a bien été réalisée et que les performances attendues sont remplies. Pour cela, le modèle informationnel du chapitre 2 a été instancié pour différencier chaque flux d'entrée, de sortie, les fonctions et leur support comme montré dans la Figure 60.

Dans l'analyse fonctionnelle il y a des fonctions qui ont la même finalité mais qui se trouvent en différents endroits du processus et qui sont supportées par des composants de même type mais d'occurrence différente. Par exemple, les fonctions « transférer » (i.e. fonctions A111, A113, A115) ont comme finalité la modification des propriétés d'espace du ferment ou les fonctions « filtrer » qui ont comme finalité la transformation des propriétés de forme du ferment (i.e. fonctions A112, A114). Pour des raisons de clarté les fonctions avec la même finalité ne sont étudiées qu'une seule fois. Cela permet de simplifier la représentation informationnelle sur la Figure 60.

Ainsi, la Figure 60 illustre les différentes transformations des ingrédients liquides pour obtenir le ferment et les propriétés les plus importantes à chaque opération. Par exemple, lorsque le liquide est filtré, il devrait avoir une charge bactérienne donnée. Cette fonction garantit l'exclusion des solides en suspension et des bactéries dans le processus.

Dans cette figure sont identifiées les exigences au niveau du ferment produit que sont sa composition, son débit, son uniformité et sa charge bactérienne.

Cette représentation a aussi été réalisée pour le gaz montrant par exemple, lorsqu'il est filtré, sa composition doit rester identique, la charge bactérienne doit diminuer à travers la rétention de certaines particules extérieures par le filtre et son humidité doit également diminuer.

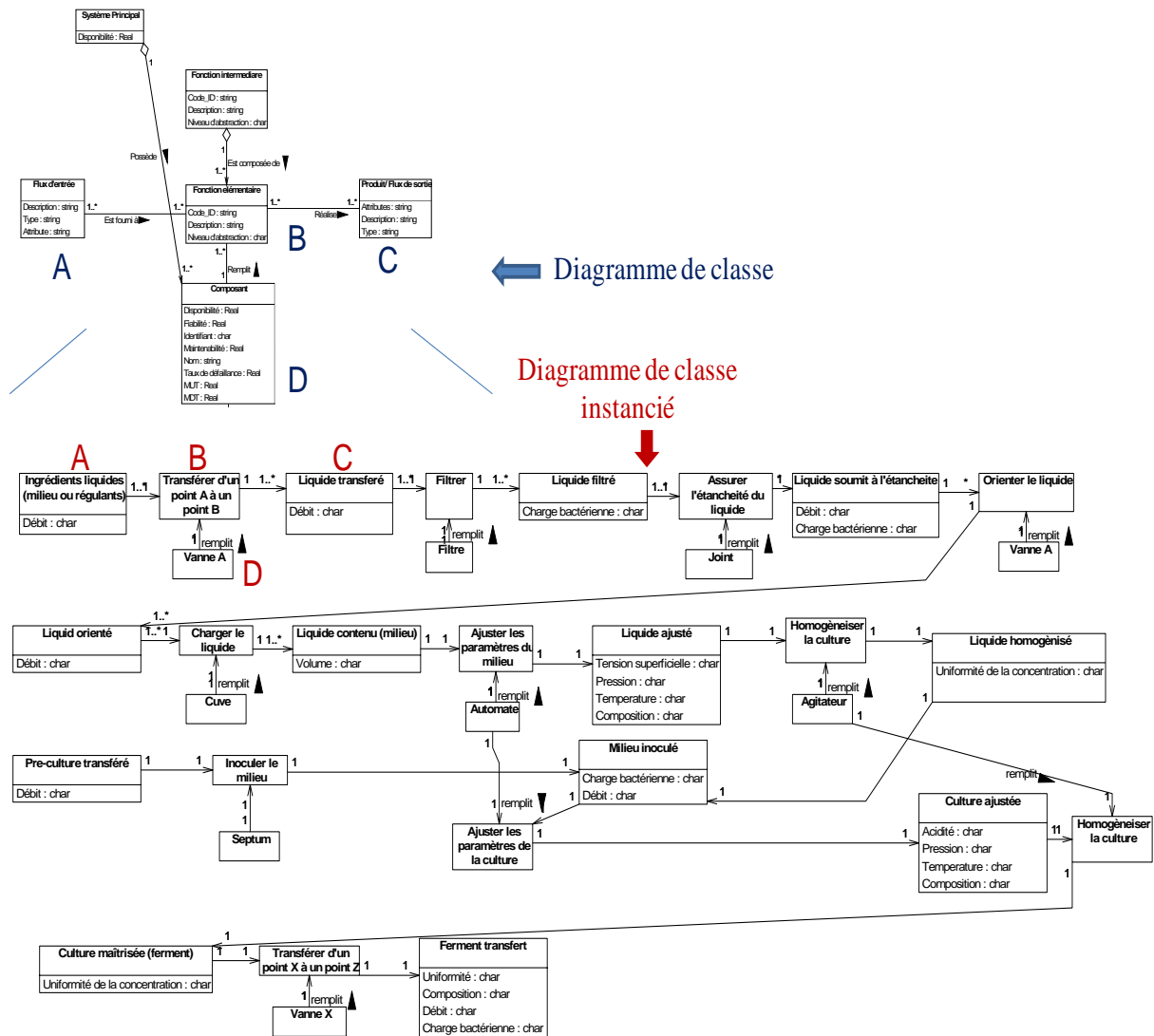


Figure 60. Vue informationnelle des fonctions associées au traitement d'ingrédients liquides

Sur la base de l'identification de ces propriétés de flux, l'objectif est ensuite d'étudier à travers la vue dysfonctionnelle, les déviations de ces propriétés.

5.3.3. Vue dysfonctionnelle du SP

L'étude HAZOP consiste à identifier les déviations des attributs du flux (obtenus dans la vue informationnelle) puis à déterminer les causes de ces déviations ainsi que les conséquences sur les autres fonctions.

Pour identifier les causes et les conséquences de la déviation nous nous appuyons sur le principe de causalité (décrit dans le chapitre 2) qui énonce que *la cause de déviation d'un attribut de flux est produite par la déviation du flux consommé par la fonction ou par l'occurrence d'un mode de dégradation/défaillance de son support (causes intrinsèques au composant). L'effet potentiel (conséquences) est propagé par l'entrée d'un flux dévié sur la(les) fonction(s) subséquente(s) (Muller, 2005).* De plus, dans l'objectif d'évaluer les stratégies de maintenance et en tenant en compte des interactions entre le SP et le SM (i.e. vue fonctionnelle sur les interactions entre le SP et le SM Figure 30) nous considérons que le composant peut produire une déviation d'un attribut

de flux d'une fonction du SP lorsqu'il est indisponible à cause des interventions de maintenance. La Figure 61 montre un extrait de l'étude HAZOP.

Propriétés	Déviations	Causes	Consequences
<i>Débit d'ingrédients liquides</i>	Plus	Plus d'ingrédients en transfert Plus d'air comprimé (AD)	Plus des liquides en transfert (par rapport à a valeur attendue) Rejet du milieu
	Moins	Moins d'air comprimé (AD) Moins d'ingrédients en transfert	Moins des liquides en transfert (par rapport à a valeur attendue) Cycle de production plus long, baisse du rendement de production
	Pas	Vanne défaillante (non-disponible) Vanne en entretien (non-disponible) Pas d'ingrédients en transfert Pas d'ordre de l'automate (WD). (Automate non-disponible).	Pas des liquides en transfert Pas de production
<i>Contenu d'O2</i>	Plus	Plus de gaz entrant (AD)	Oxydation du milieu/ culture
	Moins	Moins de gaz entrant (AD) Pas d'ordre de l'automate (WD). (Automate non-disponible).	Moins de charge bactérienne Cycle de production plus long
	Pas	Cuve défaillante (non-disponible) Cuve en entretien (non-disponible)	Moins de charge bactérienne

Figure 61. Extrait de l'étude HAZOP sur le système de production de ferment

Par exemple, le débit de flux possède trois déviations possibles : PLUS (trop de débit), MOINS (débit trop faible) et PAS (aucun débit). Les causes sont la déviation de flux entrants (par exemple pour la déviation « moins du débit de flux », l'une des causes est « moins d'air comprimé (AD) », ce qui ralentit l'ouverture de la vanne) ou le dysfonctionnement du support de la fonction par exemple, l'une des causes pour la déviation « pas du débit de flux » est la « vanne défaillante ». Une autre cause de cette déviation peut être due à des actions de maintenance « vanne en entretien » qui peuvent rendre le composant non-disponible.

Dans cette étude nous ne spécifions que deux états pour le support : disponible ou non-disponible. Toutefois le passage d'un état nominal (disponible) à « non-disponible » se fait par une succession d'états de dégradation. Ainsi l'agrégation de l'information que nous proposons en deux macro-états occasionne la perte d'information et certains effets ne sont plus spécifiés dans notre étude, comme par exemple pour la déviation « moins du débit du flux » où l'une des causes possibles devait être « vanne dégradée (pas d'ouverture complète) ». Pour éviter cette simplification, il est nécessaire de réaliser des analyses dysfonctionnelles quantitatives importantes. Malheureusement souvent les industriels ne disposent pas de ces informations. Pour cette raison nous avons fait le choix de modélisation des supports avec deux états.

A partir de l'ensemble des connaissances issues de l'instanciation de modèles métiers sur les différents points de vue, nous devons maintenant instancier des motifs pour créer le modèle PRM global.

5.3.4. Structure du SP en PRM

5.3.4.1. Motifs de modélisation des fonctions du SP au niveau d'abstraction élémentaire

Pour unifier les connaissances du processus de fermentation vers un modèle exécutable PRM, il est nécessaire d'instancier les motifs génériques PRM développés dans le chapitre 3 et de les déployer sur notre cas d'étude ce qui correspond au départ, à instancier les motifs « flux » et « fonctions » pour les fonctions élémentaires du processus de fermentation. Ces instanciations ne sont possibles que sur la base de la connaissance formalisée dans les modèles métiers spécifiques.

A titre d'exemple, nous allons construire le modèle pour la fonction A1134 « orienter le transfert vers le J503 ». Celle-ci participe à la réalisation de la fonction « A11 » où les ingrédients liquides passent par des joints qui garantissent l'étanchéité de la ligne (fonctions A111), des filtres stérilisant les ingrédients (fonction A112). Ensuite les ingrédients passent par un sous-système « ligne de chargement » (fonction A113) (composé principalement de vannes automatiques ou manuelles régulant le débit (fonctions A1132, A1134)), des joints (fonctions A1131, A1133, A1135, A1136) pour enfin être de nouveau filtrés (fonction A114) (Figure 62, Figure 63).

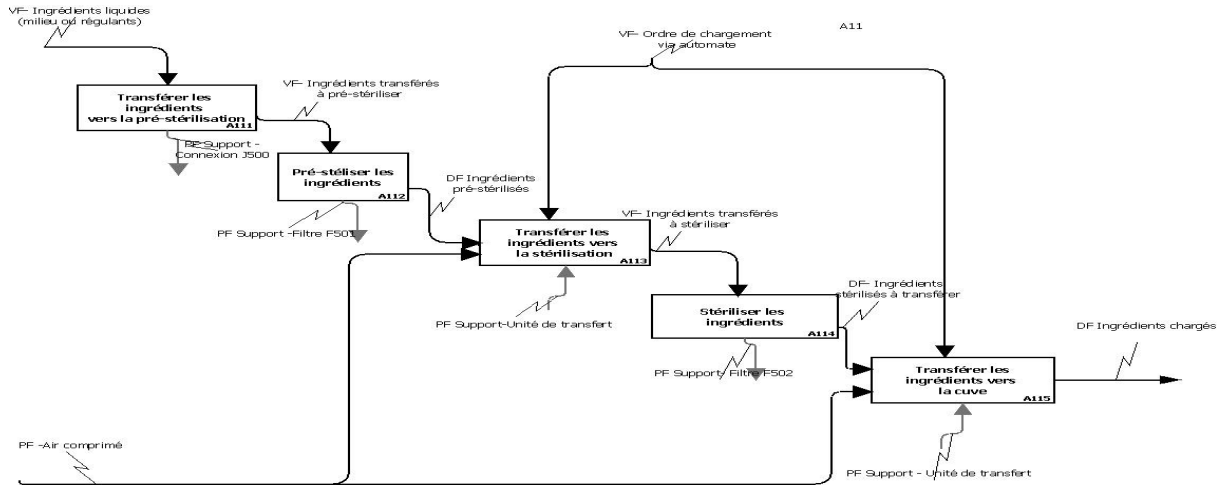


Figure 62. Extrait du diagramme fonctionnel pour la représentation des fonctions élémentaires du processus de fermentation - Niveau A11

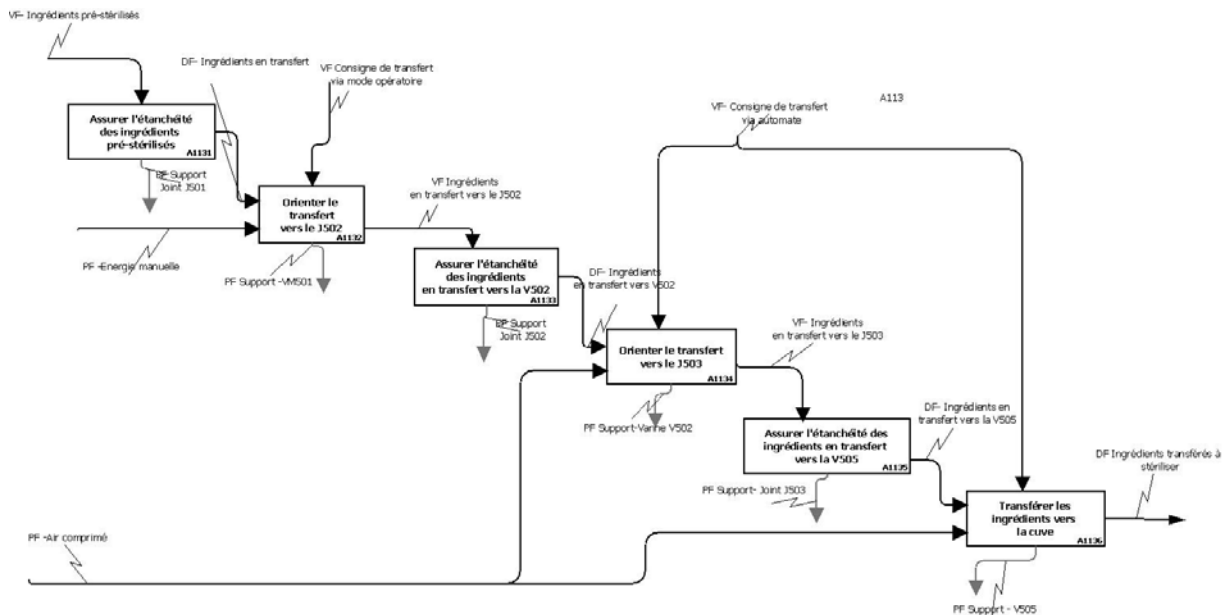


Figure 63. Extrait du diagramme fonctionnel pour la représentation des fonctions élémentaires du processus de fermentation- Niveau A113

Dans notre cas les flux d'entrée de la fonction A1134 « orienter le transfert vers le J503 » sont les ingrédients liquides en transfert, l'air comprimé et la consigne. Alors en appliquant les règles de construction du motif PRM spécifiées dans le chapitre 3, les flux d'entrées sont représentés par

des variables ou nœuds d'entrée (racine). Le flux de sortie dépend de l'état de tous les flux entrants à cette fonction : la consigne, l'air comprimé et les ingrédients en transfert ainsi que son support (la vanne « V502 »). Le flux de sortie de la fonction A1134 devient le flux d'entrée de la fonction suivante A1135. De cette façon, il est possible de relier les différentes fonctions d'un même niveau d'abstraction.

Le passage de ces connaissances vers un modèle PRM se fait à travers l'instanciation de classes génériques spécifiées. La Figure 64 montre, par exemple, le transfert d'ingrédients liquides. Pour l'intégrer au sein d'un modèle PRM :

- La classe « Flux_debit_dyn_va » est instanciée en : « Flux_debit_dyn_va flux_debit_A1133 »; « Flux_debit_dyn_va flux_debit_A1134 »,
- la classe « Support » est instanciée comme : « Support_envir support_V502 »,
- la classe « Flux » est instanciée comme « air » et « consigne »,
- ensuite, nous relient les instances selon les relations de dépendance entre elles. Pour réaliser la fonction « orienter le transfert A1133 » il est donc nécessaire de relier le flux entrant « flux_debit_A1133 » avec le support « V502 » de cette façon : flux_debit_A1133.support_envir = V502.

Cette Figure 64 illustre les classes, les instances sur le langage Skool (en pointillé), les dépendances et la représentation en RB.

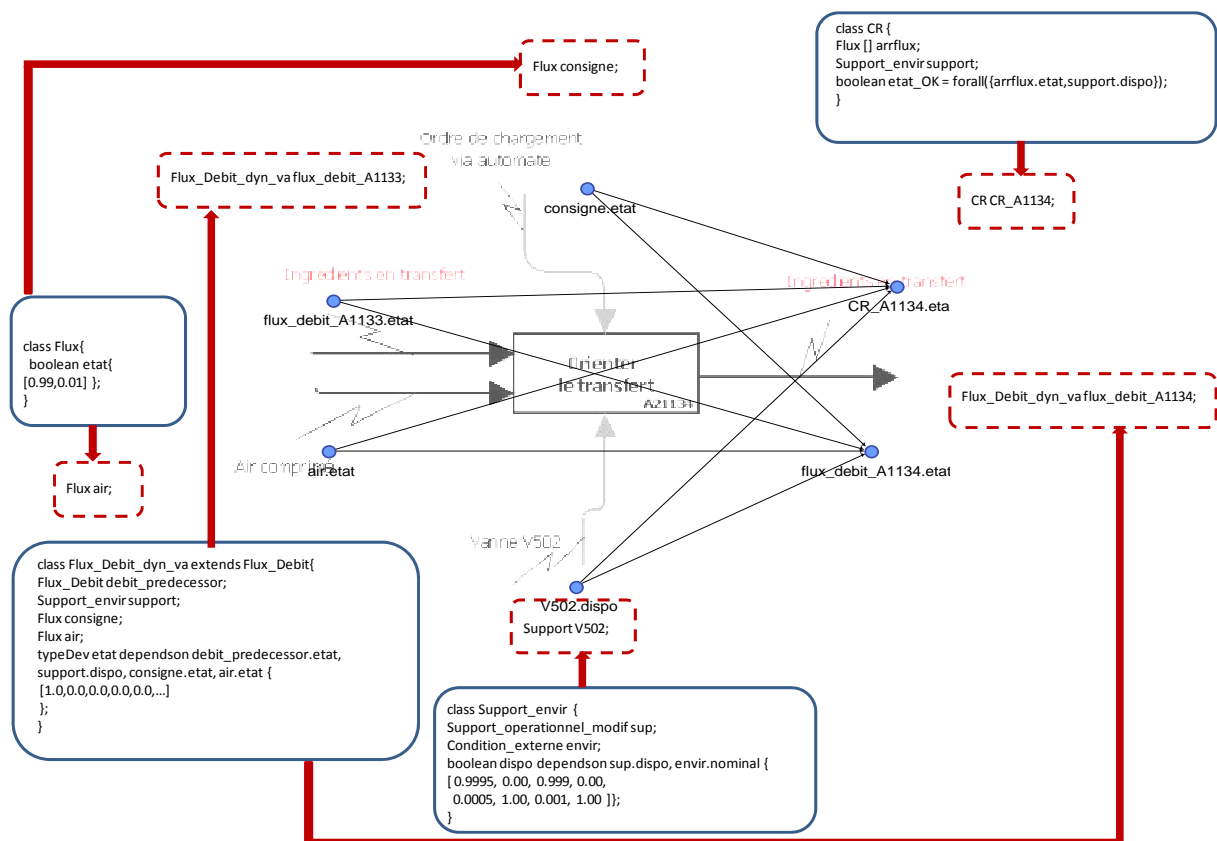


Figure 64. Passage du diagramme SADT à l'instanciation des motifs décrits dans Skool pour la fonction « A1134 »

5.3.4.2. Motifs de modélisation sur les différents niveaux d'abstraction du SP

Tel que nous l'avons décrit dans la section 3.3.3 pour agréger les informations dans des niveaux supérieurs d'abstractions, lorsqu'il s'agit d'un système en série, nous appliquons un ET logique sur l'ensemble des fonctions élémentaires (Figure 65).

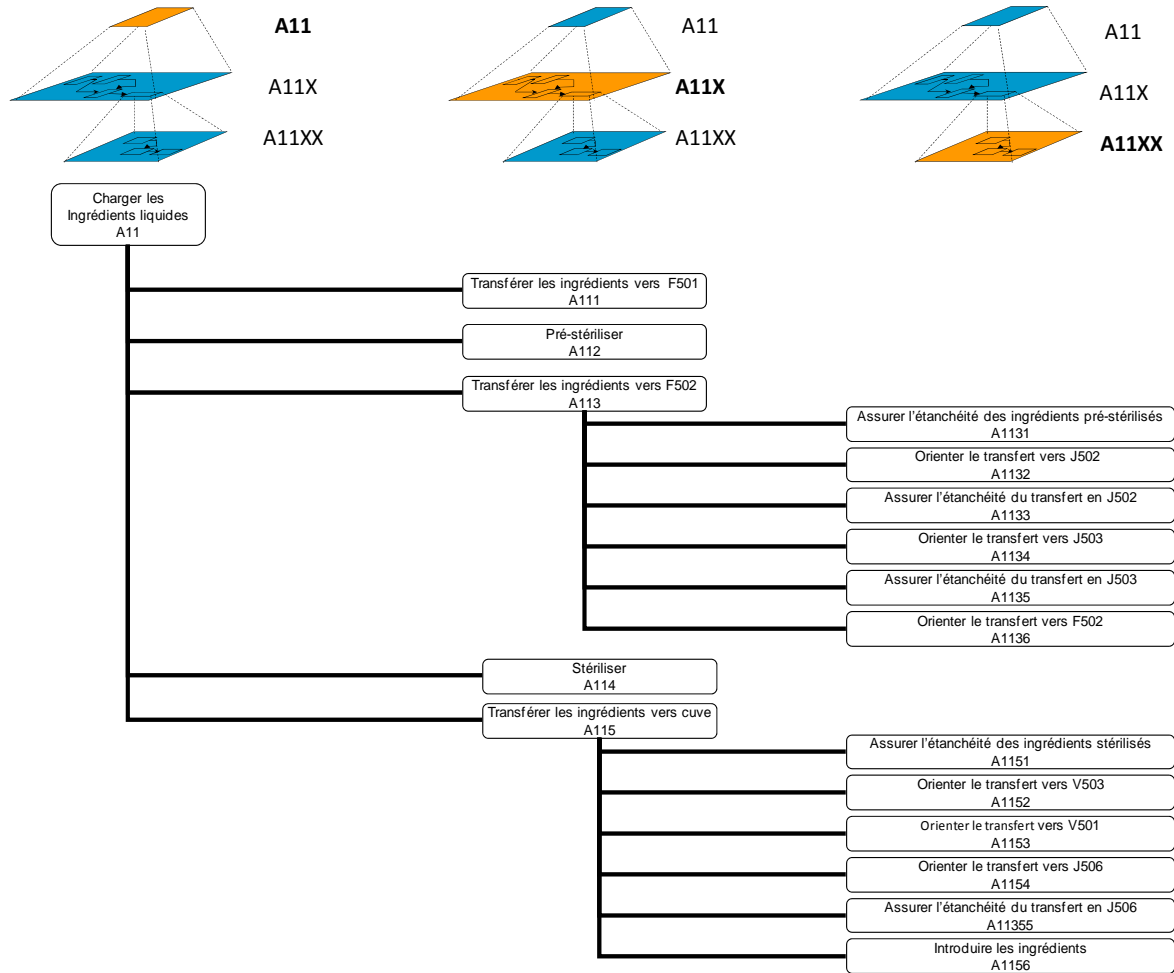


Figure 65. Décomposition fonctionnelle de la fonction « A11 »

Par exemple, pour calculer la disponibilité de la fonction « transférer les ingrédients A113 » nous nous basons sur les fonctions de structure issues du diagramme de fiabilité. Ces représentations montrent que les fonctions sont organisées en série (Figure 66). Pour cette raison nous regroupons au sein d'un ET logique les fonctions élémentaires qui la composent (A1131, A1132, A1133, A1134, A1135 et A1136).

Pour continuer l'estimation des performances au niveau supérieur, la procédure est identique. Dans notre exemple toutes les fonctions sont réalisées en série alors l'agrégation est réalisée en utilisant une fonction ET logique. Cette agrégation permet d'estimer des performances au niveau système, sous-systèmes et composant, nécessaires pour la prise de décisions au niveau stratégique de la maintenance.

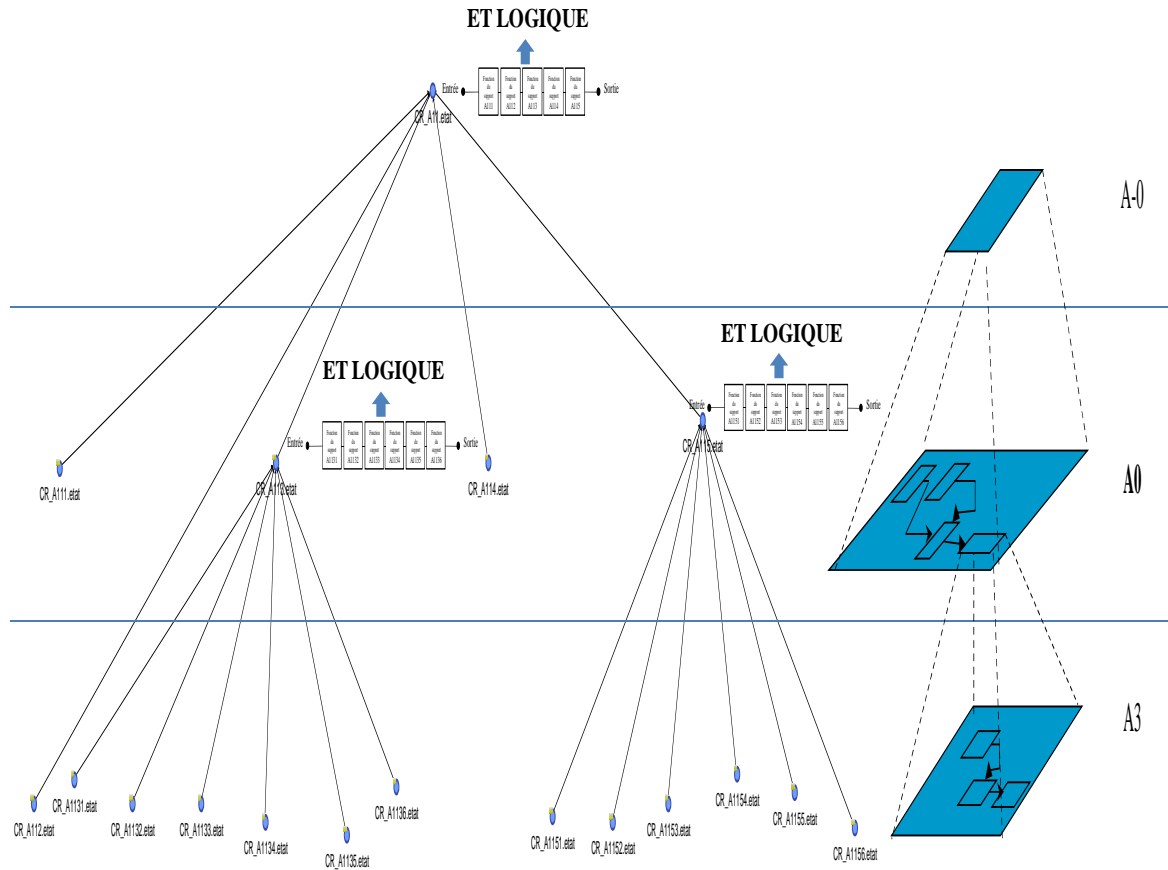


Figure 66. Assemblage de motifs du SP sur différents niveaux d'abstraction

5.4. Formalisation de la connaissance du système de maintenance

5.4.1. Vue fonctionnelle du SM

Pour garantir les performances au niveau système il est nécessaire d'abord d'étudier comment le SM participe à la satisfaction de ces performances à travers des procédures d'entretien et de maintenance des composants supports à des fonctions élémentaires.

Sur le processus nous trouvons différents composants supports comme deux automates, les capteurs, les clapets, le condenseur, l'échangeur thermique, les joints, la cuve, le septum, la soupape et des vannes.

La majorité de ces composants est soumis au vieillissement c'est-à-dire que les composants subissent un processus de dégradation au fur et à mesure du temps aboutissant à la perte de certaines propriétés. Pour les principaux composants, les modes de dégradation/défaillance les plus courants sont :

- Les joints - ils se dégradent à cause de l'usure et cette dégradation est fonction des conditions auxquelles ils sont soumis. Leur dysfonctionnement produit une perte d'étanchéité (fuites).

- Les vannes à membrane - la membrane de la vanne peut se dégrader provoquant des fuites. La vanne peut également rester ouverte ou fermée (blocage ou mauvaise valeur de consigne).
- L'échangeur thermique - fuites dans les tubes dues à la corrosion.
- Le clapet : l'usure ou l'endommagement des joints d'étanchéité ou de la bille qui empêche le retour du fluide.
- Soupape - si le ressort est défaillant alors la soupape reste dans un état fermé. Il peut aussi y avoir l'usure de la bille ou des joints produisant des fuites.
- Filtre - la dégradation des joints produit des fuites externes. Ces composants sont soumis à des mécanismes de dégradation comme la corrosion. Le filtre peut être également encrassé par des résidus en suspension dans les fluides qui sont transférés.
- Septum - l'usure ou l'endommagement de la membrane peut produire la pollution du milieu de culture.

D'autres composants ne se dégradent pas aussi fortement avec le temps mais ont plutôt une probabilité d'être défaillant considérée comme constante au cours de leur vie utile. Dans notre cas, nous pouvons considérer que la cuve, l'automate et les capteurs ont une durée de vie aléatoire. La cuve est en acier inoxydable, elle ne subit donc pas un processus de corrosion conséquent mais peut être endommagée par des chocs avec des éléments extérieurs. Les automates tombent généralement en panne par des causes externes comme une erreur dans le programme par exemple. Les défaillances dues à des causes internes comme la défaillance d'un composant d'une carte (d'entrée ou de sortie) sont extrêmement rares. Enfin, les capteurs peuvent donner une information erronée sur le processus à cause d'un mauvais étalonnage ou d'un grippage. Ces défaillances sont considérées comme aléatoires.

Pour faire face aux mécanismes de dégradation ainsi que pour garantir le bon fonctionnement du système, il est possible de réaliser différents choix de stratégies de maintenance dont l'élément clé est le plan de maintenance.

Ce plan est défini en fonction de la criticité (en fonction de l'impact d'un composant sur l'hygiène dans le processus et sur la composition du milieu) de chaque composant. La fonction de l'échangeur thermique est la régulation de la température. Comme la déviation de la température ne génère pas le rejet du milieu, l'échangeur thermique est considéré comme un composant de basse criticité avec peu d'impact sur la sécurité ou la production, et les seules interventions prévues sont les remplacements correctifs lors d'une défaillance.

A contrario, les joints et les filtres sont de composants critiques surtout au niveau de la sécurité sanitaire. Tel que spécifié dans l'HAZOP, la défaillance de l'un de ces composants peut engendrer la pollution du milieu (charge bactérienne supérieure à celle attendue) et a pour conséquence le rejet du milieu. En plus des joints et des filtres, il faut considérer aussi la maintenance des vannes et des clapets puisque leur défaillance peut altérer la composition du milieu. Enfin la soupape peut générer des problèmes au niveau de la sécurité.

Par rapport à cet aspect sécuritaire mais aussi de pertes de production, il est donc nécessaire d'entretenir les composants critiques de façon préventive. Mais ils existent plusieurs alternatives pour cette maintenance préventive. En ce sens nous allons chercher à évaluer plusieurs scénarios au niveau la maintenance préventive sur une période de 5 ans.

- Actions systématiques

Des actions de maintenance préventive systématique sont proposées. Ces actions consistent en des remplacements des composants critiques du système. Elles sont donc considérées comme des actions avec une efficacité « parfaite ».

Ces actions de maintenance peuvent être représentées comme des fonctions support au système de maintenance. En ce sens, le « remplacement d'un composant » est normalement perçu comme une fonction qui transforme l'état du support (améliore l'état du composant vis-à-vis de son fonctionnement). Ceci est illustré dans la Figure 67 pour les vannes et les joints.

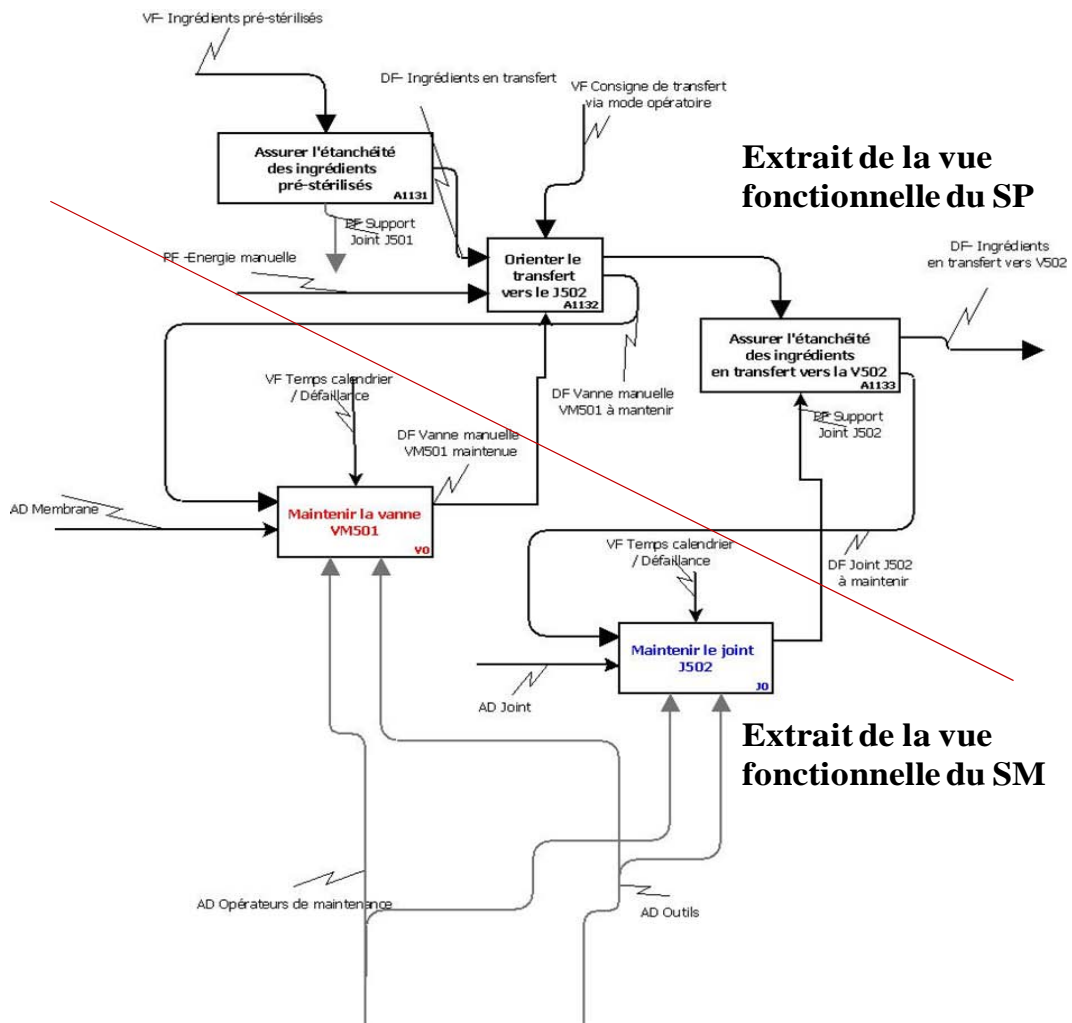


Figure 67. Fonctions support au SP : « maintenir les vannes et les joints »

- Actions conditionnelles

Pour détecter des anomalies dans le fonctionnement et optimiser l'utilisation des ressources, il est logique de mettre en œuvre des stratégies conditionnelles. L'état du composant est ainsi

surveillé à travers des indicateurs de sa dégradation ou la déviation d'un flux symptôme de cette dégradation. Pour cela, nous avons identifié les variables par lesquelles il est possible d'observer l'état des composants critiques (Tableau 17).

Composant	Indicateur de dégradation/ déviation
Joints	Débit
	Charge bactérienne du milieu
Vanne	Débit
Filtre	Charge bactérienne
	Solides/ liquides en suspension

Tableau 17. Variables représentatives de la dégradation de composant

Ces variables sont surveillées par des débitmètres ou des analyses de solides/liquides en suspension. Une fois que la variable dépasse un seuil défini, une action de remplacement du composant est déclenchée. Toutefois, nous faisons l'hypothèse que la définition des probabilités de fausse alarme et de non-détection est une fonction de la fiabilité du système lui-même (acquisition, transmission, traitement de données...) et non de l'identification d'un seuil adéquat.

5.4.2. Vue informationnelle du SM

La partie informationnelle de la maintenance est générique et n'as pas besoin de particularisation. De cette façon, les états définis dans le chapitre 2 sur le diagramme de classe sont aussi applicables à ce cas d'étude. Par exemple, un outil, peu importe lequel, aura un attribut « disponibilité ».

5.4.3. Vue dysfonctionnelle du SM

L'analyse dysfonctionnelle définie dans le chapitre 2 est directement transposable à ce cas d'étude sans développement de spécificité. En effet, par exemple, un outil aura un attribut « disponibilité » et la déviation de cet attribut amène à la « non-disponibilité » de l'outil. Ainsi quel que soit l'outil exploité pour la maintenance de cette application industrielle (marteaux, tournevis, une clef...), l'outil se verra associer ces 2 attributs.

5.4.4. Structure du SM en PRM

5.4.4.1. Motifs de modélisation du plan de maintenance

Pour l'instanciation de motifs comme le plan de maintenance, il est nécessaire de réutiliser ce motif pour chaque type de composant. Cela amène à un motif du plan de maintenance qui intègre les actions systématiques et/ou conditionnelles pour chaque vanne du SP, par exemple, comme montré dans la Figure 68.

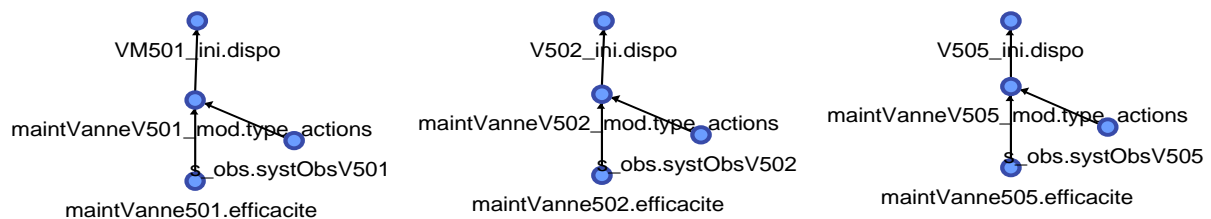


Figure 68. Motif de modélisation du plan de maintenance des vannes

Ce même motif est aussi particularisé pour la maintenance des filtres et des joints, ainsi que pour la maintenance de chacun des autres types de composants implantés sur la ligne de ferment.

5.4.4.2. Motifs de modélisation de l'efficacité de la logistique

Comme représenté dans la vue fonctionnelle du SM, toute intervention de maintenance, que ce soit le remplacement de joints, de vannes ou de n'importe quel composant, peut être vu comme une fonction qui a besoin d'outils, de personnel, de matériel et qui est déclenchée selon la nature de l'action de maintenance.

Pour représenter comment les choix concernant le système logistique au niveau stratégie d'approvisionnement, stock,... impactent les performances du SM, nous évaluons comment l'ensemble de ressources, pièces de rechanges, personnel, outils, etc. sont capables de supporter les interventions de maintenance.

Ainsi le motif correspondant à la logistique est intégré une seule fois dans le modèle PRM (Figure 69). Ce choix est fait en fonction des informations disponibles sur le terrain.

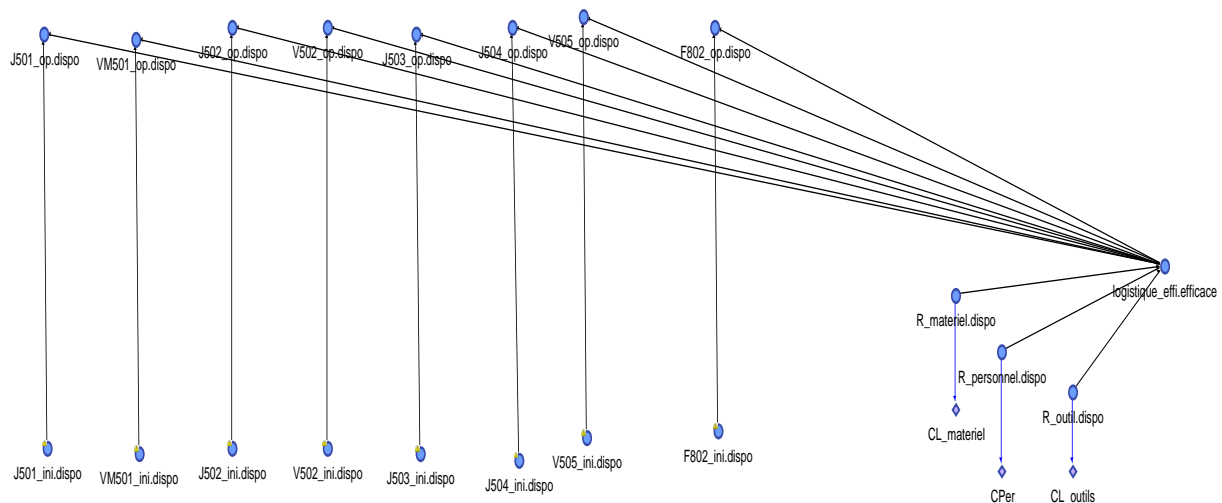


Figure 69. Motifs de modélisation de l'efficacité de la logistique

5.4.4.3. Motifs de modélisation de l'efficacité du collectif du travail

Pour étudier l'impact des performances des opérateurs sur les performances du composant, nous avons fait le choix d'intégrer le motif correspondant qu'une seule fois (Figure 70). De cette manière, nous considérons que la performance du collectif du travail en maintenance impacte tous les composants du SP.

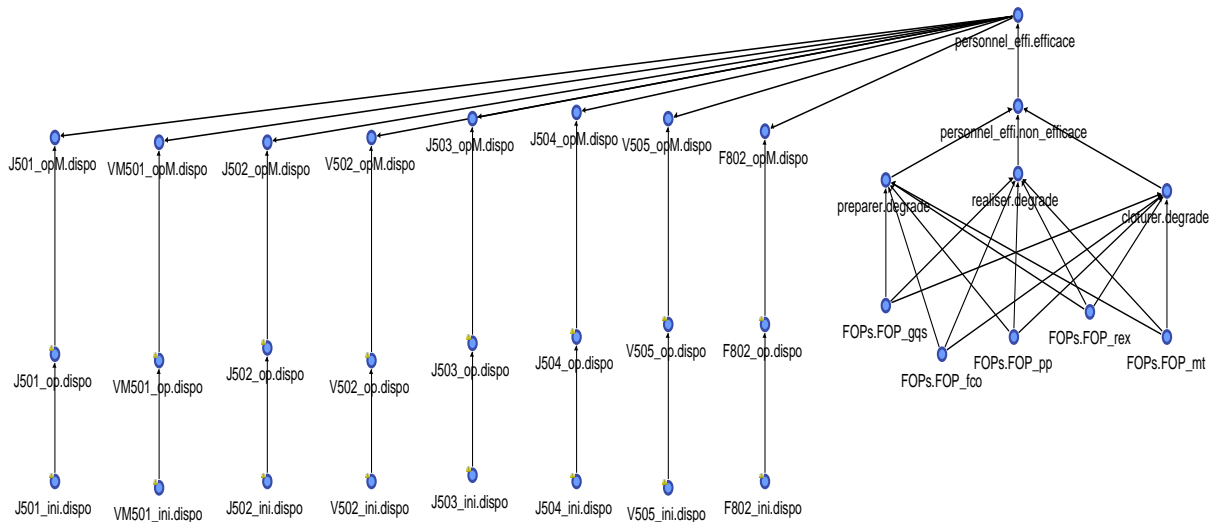


Figure 70. Motifs de modélisation de l'efficacité du collectif du travail

5.4.4.4. Motifs de modélisation de l'environnement

Enfin, le dernier aspect qui modifie l'évolution des mécanismes de dégradation est l'environnement auquel le composant est soumis. Nous avons différencié deux types d'environnement : normal et sévère. Selon l'avis d'experts de l'entreprise la plupart des composants sont soumis à un environnement « normal » en traitant une charge de production pour laquelle ils ont été conçus. Toutefois, ce n'est pas le cas pour certaines vannes du système. Les vannes V501, V502 et V504 sont soumises à un environnement « sévère », c'est-à-dire qu'elles passent plus de temps dans un environnement « non-nominal » que les composants soumis à un environnement « normal ». Cet environnement a été défini en fonction du nombre de sollicitations d'une vanne. Ces vannes sont plus sollicitées dans les phases de nettoyage et stérilisation afin d'activer la circulation de vapeur sur le circuit de production. De plus la vapeur produit une dégradation accélérée. Puisqu'il y a une sollicitation plus importante, les conditions d'opération pour ces vannes sont considérées comme des environnements « sévères ». Pour cette raison deux variables sont différenciées dans la particularisation de ce motif en PRM : environnement « de tout le système » et environnement « du sous-ensemble de composants V501/2/4 » (Figure 71).

L'interconnexion de tous les motifs préalablement instanciés, nous permet d'obtenir le modèle global, modulaire et représentatif des niveaux sous-fonctions, fonctions élémentaires et tous les éléments supports à ces fonctions (Figure 72).

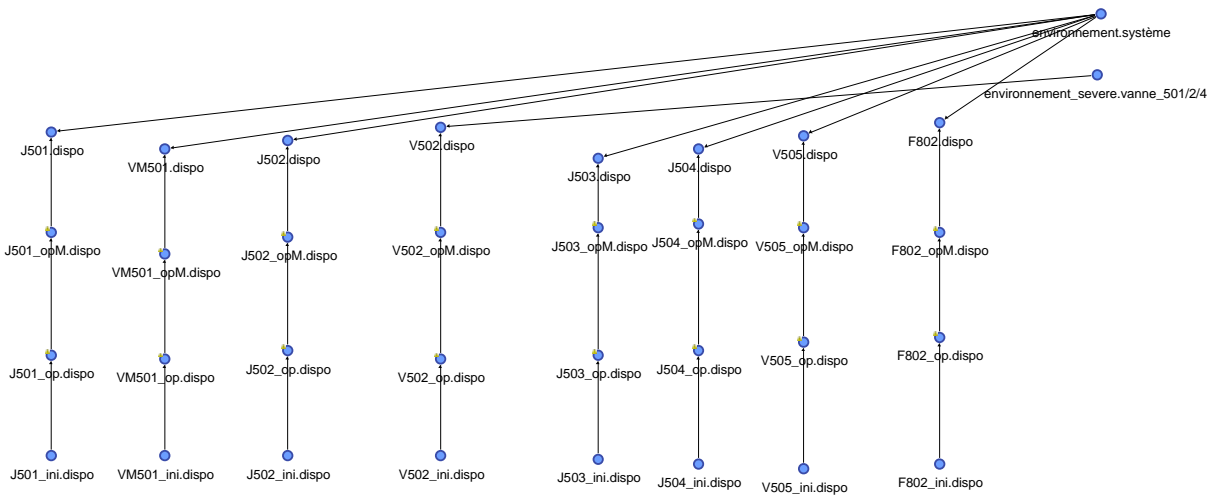


Figure 71. Motifs de modélisation de l'environnement

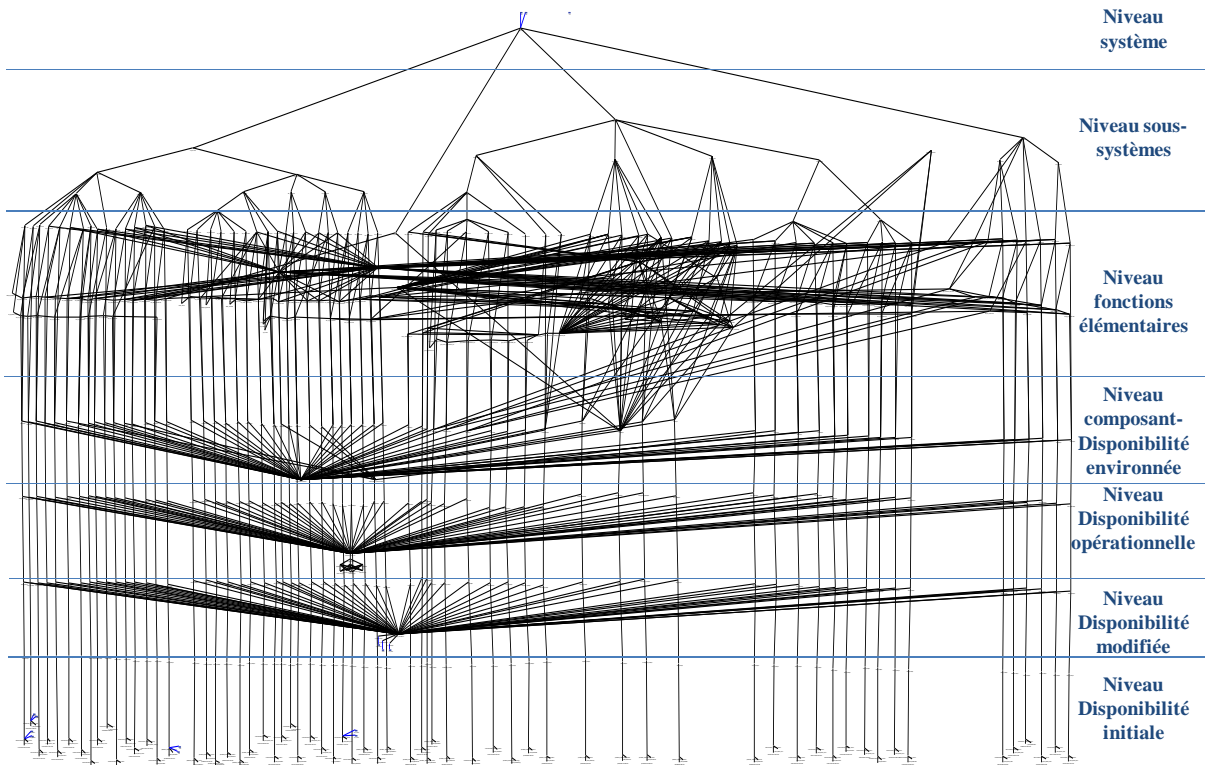


Figure 72. Modèle global en PRM du système de production de ferment et de son SM (65 composants)

5.5. Impact sur les performances du SP

5.5.1. Impact sur l'aspect qualité du SP

Pour estimer la probabilité d'avoir un flux sortant avec une qualité produite conforme, il suffit d'agrèger au sein de notre modèle PRM les différentes variables correspondant aux exigences du flux de sortie ou d'attributs du flux dans une variable qu'on appellera « Conformité du flux » (Figure 73). Cette variable a deux modalités CF= {nominal (OK), non-conforme (NOK)}.

Nous considérons aussi que le ferment est conforme lorsqu'il remplit les exigences au niveau du débit, charge bactérienne, uniformité du flux et composition (voir Figure 60). Pour regrouper ces variables, nous utilisons une agrégation de type ET logique car le produit est conforme uniquement lorsque toutes ces exigences sont satisfaites simultanément.

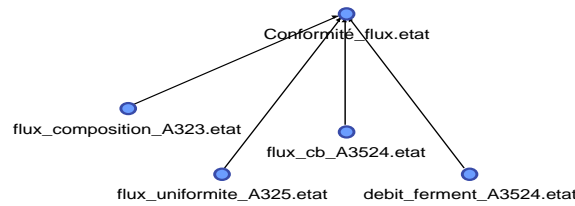


Figure 73. Variable d'agrégation pour la « conformité du flux »

5.5.2. Impact sur les coûts dans les évaluations des stratégies de maintenance

Nous souhaitons également évaluer l'impact financier des différentes alternatives au sein de notre modèle PRM. Les coûts et les revenus sont pris en compte sur une période de 43800 heures (5 ans). Ces valeurs ne sont pas réelles mais nous avons cherché à conserver la proportionnalité entre les variables utilisées dans les simulations... telle qu'elle existe entre les variables réelles qui nous ont été montrées. Nous identifions et intégrons les éléments suivants dans notre modèle :

- Volume d'affaires (VA) = 87.600.000 € Ce sont les chiffres d'affaires dégagés par la vente de la production.
- Coûts fixes = 1.500.000 € Ceux-ci intègrent les coûts liés au loyer, la gestion du personnel...
- Coûts de production (CP) = 58.400.000 € Ces coûts intègrent les coûts liés à l'énergie et aux matières premières pour la fabrication des produits.
- Coûts de maintenance (CM) : cette variable comprend les coûts liés à l'énergie et aux coûts des consommables et pièces de rechanges pour les interventions de maintenance. Il est décomposable en :
 - Coûts de maintenance (CM) associés aux vannes = 750.000 €
 - Coûts de maintenance (CM) associés aux filtres = 100.000 €
 - Coûts de maintenance (CM) associés aux joints = 6.250 €
 - Coûts de maintenance (CM) associés aux autres composants = 38.750 €
- Coûts de logistique (CL) : ce sont des coûts associés au stockage des matériels nécessaires pour réaliser les interventions de maintenance. Ils sont décomposables en :
 - Coûts stockage matériaux = 20.000 €
 - Coûts stockage outils = 5.000 €
- Coûts du personnel (CPer) = 420.000 € Ces sont des coûts associés à la charge du personnel de maintenance.

- Coûts de pénalisation (CD) : Ce sont les coûts associés aux pertes de production ou à la perte de qualité du produit. Ces coûts sont calculés en fonction du volume de production.
 - Coûts de pénalisation corrective associés aux vannes = 6.000.000 €
 - Coûts de pénalisation corrective associés aux filtres = 1.280.000 €
 - Coûts de pénalisation corrective associés aux joints = 10.000.000 €

Ces coûts sont liés à la pollution de la cuve à cause de la défaillance (ou fuite) de l'un de ces composants. Cela occasionne la perte du ferment dans la cuve avec en plus un temps additionnel d'indisponibilité pour le nettoyage et dépollution du SP.

5.5.2.1. Intégration des coûts vers le modèle PRM

Pour intégrer ces coûts au sein de notre modèle PRM, nous définissons les différents types de coûts au sein de chaque nœud. La Figure 74 montre une partie de l'intégration de ces coûts au sein du modèle PRM.

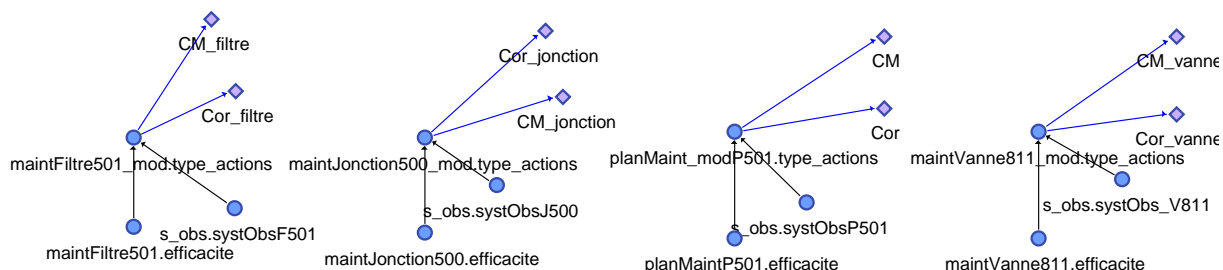


Figure 74. Extrait de l'intégration des coûts vers le modèle PRM

Le Tableau 18 ci-dessous synthétise les nœuds qui intègrent les coûts, les modalités liées aux nœuds et la valeur monétaire.

Nœud	Modalités	Valeur monétaire (€)
Coûts Fixes	CF	-1.500.000
VA	Réalisée	87.600.000
	Non-réalisée	0
CP	Réalisée	-58.400.000
	Non-conforme	0
CM (d'autres composants)	CM,CP	-41.000
	CM,CM	0
	CM,SP	0
	CM,SM	0
	CM,SI	0
	CM,COP	0
	CM,COM	0
	CM,COI	0
CM vannes	CM_vannes,CP	-750.000
	CM_vannes,CM	0
	CM_vannes,SP	0
	CM_vannes,SM	-1.050.000
	CM_vannes,SI	0
	CM_vannes,COP	-1.250.000
	CM_vannes,COM	-850.000
CM_vannes,COI	0	
CM filtres	CM_filtres,CP	-100.000
	CM_filtres,CM	0

	CM_filtres,SP	0
	CM_filtres,SM	0
	CM_filtres,SI	0
	CM_filtres,COP	0
	CM_filtres,COM	0
	CM_filtres,COI	0
CM joints	CM_joints,CP	-6250
	CM_joints,CM	0
	CM_joints,SP	0
	CM_joints,SM	-18125
	CM_joints,SI	0
	CM_joints,COP	-1.506.250
	CM_joints,COM	-1.506.250
	CM_joints,COI	0
CL matériels (pieces rechanges)	Disponible	-20000
	Non-disponible	0
CL outils (pieces rechanges)	Disponible	-20000
	Non-disponible	0
CPer	Disponible	-420.000
	Non-disponible	- 420.000
C Cor vannes	Cor_vannes,CP	-6.000.000 €
	Cor_vannes,CM	0
	Cor_vannes,SP	0
	Cor_vannes,SM	0
	Cor_vannes,SI	0
	Cor_vannes,COP	0
	Cor_vannes,COM	0
	Cor_vannes,COI	0
C Cor filtres	Cor_filtres,CP	-1.280.000
	Cor_filtres,CM	0
	Cor_filtres,SP	0
	Cor_filtres,SM	0
	Cor_filtres,SI	0
	Cor_filtres,COP	0
	Cor_filtres,COM	0
	Cor_filtres,COI	0
C Cor joints	Cor_joints,CP	-10.000.000
	Cor_joints,CM	0
	Cor_joints,SP	0
	Cor_joints,SM	0
	Cor_joints,SI	0
	Cor_joints,COP	0
	Cor_joints,COM	0
	Cor_joints,COI	0

Tableau 18. Coûts associés à chaque nœud du modèle

Les coûts associés au plan de maintenance étant identifiés, la phase suivante consiste à paramétrer les motifs construits.

5.6. Phase d'estimation des paramètres des motifs génériques

5.6.1. Modalités des motifs du SP et du SM

Dans cette section, les modalités des nœuds ont été définies en nous basant sur les informations contenus dans les analyses dysfonctionnelles.

a. Motifs de modélisation des fonctions du SP

- **Nœuds PF, DFentrant, VF, SF : Flux entrants (nœuds parents) / Nœuds DFsortie : Flux sortant (nœud fils)**

A l'exception de l'état nominal (OK), l'ensemble des états des flux entrants et sortants sont explicités dans l'étude HAZOP par les déviations de propriétés de ces flux. Nous montrons un extrait de l'HAZOP où les modalités d'attributs du flux sont spécifiées dans la Figure 61.

De cette façon les états identifiés pour le débit sont : {Ok, plus, moins, pas} et pour le contenu d'O₂ sont : {Ok, plus, moins, pas}.

- **Nœud CR : Flux sortant (nœud fils)**

Ce flux contient l'information sur la réussite de la fonction. Deux macro-états sont donc associés : « Ok » pour le cas où la fonction est réussie ou « Non-OK » pour le cas où elle ne l'est pas.

b. Motifs de modélisation du SM

Les modalités relatives au SM de ce cas d'étude sont celles transposées directement du chapitre 4.

Ainsi nous précisons comment traiter la connaissance terrain issue des jugements d'experts et de l'exploitation des données historiques de la GMAO (la GMAO dans l'entreprise comprend un ensemble de fichiers Excel recensant les dysfonctionnements des composants) pour paramétrer les variables du modèle de la ligne de ferment.

5.6.2. Quantification des motifs liés au SP (Figure 36)

- **Nœuds PF, DFentrant, VF, SF : Flux entrants (nœuds parents)**

Les flux entrants qui sont sous la forme des nœuds racines au sein du modèle PRM, sont quantifiés à l'aide de jugements d'experts œuvrant sur la ligne de production de ferment. Par exemple pour le nœud « Débit ingrédient F0 » la TPC spécifiée est montrée dans le Tableau 19.

Débit ingrédient F0	
Ok	99,7
Nok	0,3

Tableau 19. TPC du nœud racine « débit ingrédient F0 »

- **Nœuds CR et DFsortie : Flux sortants (nœuds fils)**

Les flux sortants dépendent de l'état des flux entrants. Le CR représente le résultat de la réussite de la mission de la fonction. La définition des probabilités conditionnelles du CR est basée sur la

logique combinatoire : il faut que tous les flux entrants soient dans un état nominal pour pouvoir réaliser correctement une fonction.

De plus, la définition de probabilités conditionnelles pour les nœuds du type « DF sortie » est basée sur l'expertise. Par exemple pour transférer le ferment (débit du flux) il est nécessaire de disposer d'une consigne, de l'air comprimé, des vannes automatiques disponibles et que le flux entrant soit dans un état nominal. Cela amène à une TPC de type (Tableau 20) :

air.etat	consigne.etat	Vanne.dispo	flux_debit.etat	Ok	Plus	Moins	Pas
true	true	true	Ok	100	0	0	0
true	true	true	Plus	0	100	0	0
true	true	true	Moins	0	0	100	0
true	true	true	Pas	0	0	0	100
true	true	false	Ok	0	0	0	100
true	true	false	Plus	0	0	0	100
true	true	false	Moins	0	0	0	100
...							
false	false	false	Plus	0	0	0	100
false	false	false	Moins	0	0	0	100
false	false	false	Pas	0	0	0	100

Tableau 20. Exemple de TPC pour les flux sortants

Si tous les flux entrants sont en état nominal, alors le débit du flux de ferment est conforme et en état nominal. Toutefois si le flux principal entrant (débit du flux de ferment) est dévié, alors le flux sortant est aussi dévié. Enfin si la consigne, la vanne ou l'air ne fonctionne pas, alors il n'y a pas de flux de sortie.

5.6.3. Quantification des motifs liés au SM (Figure 43)

a. Quantification du motif « Plan de maintenance »

- Nœud « Actions de maintenance »

Pour calculer les probabilités de réaliser chaque type d'action de maintenance avec une efficacité donnée il est nécessaire de se baser sur l'historique des défaillances. Lorsqu'il n'y a pas de plan de maintenance préventive alors la probabilité de réaliser des remplacements de composants lorsqu'ils sont en panne est de $(P(AM= corrective parfaite) = 1)$.

Toutefois, lorsque des actions préventive systématiques sont réalisées, nous faisons l'hypothèse qu'elles éliminent l'apparition d'une défaillance à chaque période de temps T_p . Par exemple si des actions de maintenance systématique pour la vanne sont réalisées à une périodicité $T_p = 8500h$, cela conduit à l'élimination de défaillance à chaque instant $t = 8500, 17000, 25500...$ comme montré dans le Tableau 21. Dans notre exemple sept actions de maintenance systématique sont réalisées sur une vanne pendant la période d'étude.

Numéro de défaillance	Temps d'apparition des défaillances	Temps d'opération entre défaillances	Type d'action de maintenance	T_p
1	4138	4138	Corrective	
2	12840	8702	Préventive	8500
3	22734	9894	Préventive	17000
4	35898	13164	Préventive	25500 / 34000
5	44987	9089	Préventive	42500

Tableau 21. Extrait d'historique de défaillances

De cette façon, nous pouvons estimer par exemple la probabilité d'une action de maintenance systématique parfaite sur l'ensemble des actions de maintenance ($P(AM = \text{systématique parfaite})$) de la façon suivante :

$$P(AM = \text{systématique parfaite}) = X_{OT\ SYSPAR} / (X_{OT\ TOTAL}) = 4 / 5 = 0,8 \quad (23)$$

Où : $X_{OT\ SYSPAR}$: Nombre d'Ordres de Travail (OT) systématique parfaite

$X_{OT\ TOTAL}$: Nombre d'OT total

De façon similaire, cette procédure est appliquée aux différentes alternatives d'interventions de maintenance. Cette procédure nous permet d'estimer d'une façon approximative la probabilité de réaliser une action de maintenance avec une efficacité donnée.

- **Nœud « Fiabilité du système d'observation »**

Le nœud « fiabilité du système d'observation » est un nœud racine. Ses trois états sont illustrés sur le Tableau 10 : $SO = \{\text{Détection, non-détection, fausse alarme}\}$.

Fausse alarme	Non-détection	Détection
3	1	96

Tableau 22. TPC du nœud « fiabilité du système d'observation »

La probabilité de non-détection est estimée à travers l'expertise provenant du département de maintenance puisque le retour d'expérience est très faible.

b. Quantification du motif « Efficacité de la logistique »

- **Nœuds sur la disponibilité des ressources : Pièces de rechanges et outils**

L'analyse des historiques sur les ruptures de stocks (consultés dans la GMAO) pour les nœuds « disponibilité des outils/ pièces de rechanges/ matériels consommables... » révèle que le stock est disponible de la façon suivante (Tableau 23) :

Disponible	Non-disponible
99,91	0,09

Tableau 23. TPC de la disponibilité de ressources

- **Nœud « Personnel (disponibilité) »**

Pour calculer la ($P(\text{personnel}) = \{\text{disponible, non-disponible}\}$) sur le nœud « disponibilité du personnel » nous étudions un extrait d'une liste de programmation des tâches de maintenance. Dans notre exemple le tableau suivant donne l'extrait de la liste de programmation (Tableau 24) de 10 tâches parmi lesquelles 5 sont préventives et 5 sont correctives :

Tâches	Type d'action	Heures - Homme programmées	Heures- Homme dépensées dans la tâche selon le programme
1	Corrective	15	15
2	Préventive	20	20

3	Préventive	10	0
4	Corrective	4	4
5	Corrective	50	50
6	Préventive	20	20
7	Préventive	8	0
8	Corrective	30	30
9	Corrective	12	12
10	Préventive	14	14
	Total Σ	183	165

Tableau 24. Extrait de la liste de programmation de tâches de maintenance

Ce Tableau 24 met en évidence les heures-hommes réelles programmées et les réelles passées dans l'activité selon le programme. Dans ces dernières (Heures- Hommes dépensées dans la tâche selon le programme), nous considérons que :

Nombre d'heures- hommes dépensées dans la tâche selon le programme \leq Nombre heures - homme programmées.

Dans le tableau il y a des tâches préventives qui ont zéro heures-hommes dépensées, c'est-à-dire elles n'ont pas pu être effectuées (dû, par exemple, à d'autres interventions plus urgentes). Avec ces données nous pouvons estimer l'indisponibilité du personnel. Nous utilisons la formule suivante:

$$P(\text{personnel} = \text{indisponible}) = \frac{X_{H-H \text{ prog}} - X_{H-H \text{ prog_ef}}}{X_{H-H \text{ prog}}}$$

Où:

$X_{H-H \text{ prog}}$: Nombre des heures - hommes programmées

$X_{H-H \text{ prog_ef}}$: Nombre des heures - hommes programmées effectuées selon le programme

Dans l'exemple nous avons :

$$P(\text{personnel} = \text{indisponible}) = (183-165)/183 = 0,0984.$$

Ce résultat est un exemple de l'estimation de la probabilité d'indisponibilité du personnel, en considérant que les mêmes situations sont susceptibles de se reproduire.

- **Nœud « Efficacité de la logistique de maintenance »**

Ce nœud contient deux états « Efficacité de la logistique de maintenance » = {efficace, non- efficace}. Tel que précisé dans le chapitre 4, nous utilisons une agrégation par un ET logique. Cela implique que la logistique n'est efficace que s'il y a une disponibilité matérielle et humaine simultanément.

c. Quantification du motif « Efficacité du collectif de travail »

- **Nœud « Efficacité du collectif de travail et de l'organisation de la maintenance »**

D'après le jugement d'experts du département d'hygiène, sécurité et environnement les FOPs ont différents impacts suivant les différentes phases des actions (Tableau 25). Ainsi pour notre cas d'étude les facteurs organisationnels ont un impact faible sur l'efficacité pour chacune des phases

puisqu'elles dégradent entre 1% et 10% l'efficacité de chaque phase. Le facteur le plus influent est la pression du personnel. Cela s'explique par la suppression récente de postes dans l'entreprise mais qui continue à produire avec les mêmes objectifs de production (situation fictive).

FOPs	Préparer $a_p \in [0,1]$	Réaliser $a_r \in [0,1]$	Clôturer $a_c \in [0,1]$
MT	99,00	99,00	99,00
GQS	99,00	99,00	99,00
FCO	99,00	99,00	99,00
PP	95,00	90,00	95,00
REX	99,00	99,00	99,00

Tableau 25. Facteurs d'aggravation des phases d'actions

De plus, la phase qui semble la plus importante pour les déroulements des actions ainsi que pour leurs efficacités est la phase de réalisation. Toutefois, d'après les modalités proposées par (Lèger, 2009) pour estimer les facteurs d'aggravation, la phase « réaliser » a un impact moyen sur l'efficacité du collectif de travail. Ainsi même quand toutes les phases se trouvent dans un état « dégradé » elles peuvent dégrader l'efficacité du personnel au maximum à 50% de son efficacité (Tableau 26).

Variable	Préparer $a_p \in [0,1]$	Réaliser $a_r \in [0,1]$	Clôturer $a_c \in [0,1]$
Efficacité du collectif de travail	90,00	70,00	90,00

Tableau 26. Facteurs d'aggravation de l'efficacité du collectif de travail

De plus, il est possible d'être dans un état dégradé même lorsque toutes les variables parents sont dans un état non-dégradé ou absent (leak). Cela est fait pour intégrer l'ensemble des causes qui ne sont pas directement modélisées, à cause de l'incertitude liée aux analyses organisationnelles et humaines (Tableau 27).

Variable	Leak $a_0 \in [0,1]$
personnel_effi.non_efficace	0,50
preparer.degrade	0,10
realiser.degrade	0,10
cloturer.degrade	0,10

Tableau 27. Probabilité « leak » de l'efficacité du collectif de travail et des phases d'actions

d. Quantification des facteurs exogènes : facteurs environnementaux

- **Nœud « Environnement »**

Les experts se sont basés sur le nombre de sollicitations de chaque composant pour caractériser les deux types d'environnements qui ont été identifiés : normal (environnement de tout le système) et sévère (environnement des vannes 501/2/4). Ces deux variables portent sur le temps passé dans des conditions nominales et non-nominales. Normalement les composants qui sont exposés à des conditions dites « sévères » passent plus de temps dans de conditions « non-nominales » que les composants qui sont exposés à des conditions « normales ». De cette façon ces variables ont été caractérisées de la façon suivante (Tableau 28) :

Variable	Nominales	Non-nominales
Environnement système- conditions normales	98	2

Tableau 28. TPC de conditions environnementales « normales »

La probabilité d'être dans un état « non-nominal » augmente dans le cas des composants soumis à un environnement sévère (Tableau 29).

Variable	Nominales	Non-nominales
Environnement vannes 501/2/4- conditions sévères	95	5

Tableau 29. TPC de conditions environnementales « sévères »

e. Quantification de l'état du composant: sa disponibilité

- Nœud « Disponibilité_initiale »

Lors de l'analyse de l'historique de défaillance et de la caractérisation de temps entre défaillance et temps de réparation, nous observons que la loi de Weibull représente bien les temps entre défaillances (cette loi permet de représenter le vieillissement) (Tableau 30) et que la loi Normal correspond bien aux temps de réparation.

	Loi de Weibull		
	β	α	Fonction de répartition
Vannes	3,5	9900	$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{9900}\right)^{3,5}\right)$
Jointes	2,3	7700	$F(t) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{t}{7700}\right)^{2,3}\right)$

Tableau 30. Caractérisation de temps entre défaillances

Suite à cette caractérisation, il est possible de calculer la durée moyenne de temps d'intervention (MDT) et le temps de bon fonctionnement (MUT). Puisque les interventions sont des remplacements des composants, le MUT est calculé en tenant en compte du processus de renouvellement.

Le Tableau 31 montre la durée moyenne de temps d'intervention pour les remplacements correctifs (MDT correctif), la durée moyenne de temps d'intervention pour les remplacements préventifs (MDT préventif) et le temps de bon fonctionnement (MUT). Avec ces paramètres il est possible d'estimer la disponibilité du composant en fonction des types d'actions réalisés.

Type d'action	MDT correctif (heures)	MDT préventif (heures)	MUT (heures)	Disponibilité à 43800h
Vannes				
Corrective parfaite	186	-	8907	0,9795
Systématique parfaite Tp=3000	3	18	3000	0,9932
Systématique parfaite Tp=8500	83	10	8500	0,9948
Systématique parfaite Tp=16000	185	0	8941	0,9797
Systématique parfaite Tp=25000	186	0	8907	0,9795
Conditionnelle parfaite	-	18	8800	0,9980
Joint				
Corrective parfaite	83	-	6822	0,9881
Systématique parfaite Tp=1500	2	10	1500	0,9921
Systématique parfaite Tp=2500	6	10	2500	0,9938
Systématique parfaite Tp=5000	26	7	5000	0,9935
Systématique parfaite Tp=7000	46	5	7000	0,9928
Systématique parfaite Tp=10000	69	2	7334	0,9904
Conditionnelle parfaite	-	11	6750	0,9984

Tableau 31. Paramètres des temps entre défaillances et des temps de réparation des composants

En conséquence, les disponibilités trouvées pour chacun des composants seront une entrée pour définir les TPC de chaque composant. De cette façon les TPC seront définies en fonction de la probabilité d'être disponible sachant qu'un type d'action avec une efficacité déterminée est réalisée. Pour illustrer cette notion, nous donnons l'exemple d'une vanne avec une maintenance préventive systématique à $T_p = 8500$ (Tableau 32):

Actions de maintenance modifiées	Disponible	Non-disponible
Corrective parfaite	97,95	2,05
Systématique parfaite	99,48	0,52

Tableau 32. TPC du nœud « disponibilité initiale »

Ce tableau tient compte des différents scénarios comme, par exemple, la probabilité d'arriver à réaliser la maintenance systématique à un instant T_p laquelle amène le composant à une disponibilité de 99,48 ou la probabilité de corriger de façon corrective les défaillances produisant une disponibilité de 97,95.

- **Nœud « Disponibilité modifiée »**

Nous réalisons une agrégation de type ET logique puisque les actions ne peuvent être réalisées que si la logistique nécessaire est efficace (matériaux disponibles).

- **Nœud « Disponibilité opérationnelle »**

Il est nécessaire aussi que le personnel soit efficace pour pouvoir réaliser les actions de maintenance. Pour cette raison, nous utilisons aussi une agrégation de type ET logique.

- **Nœud « Disponibilité_environnée »**

Pour différencier les conditions nominales, des conditions non-nominales d'utilisation, un facteur d'aggravation est ajouté. D'après le jugement d'experts ce facteur est de $\beta = 99,9$, cela veut-dire que l'environnement a peu d'impact sur la disponibilité du composant.

La TPC est définie selon le Tableau 33 ci-dessous :

Disponibilité.Opérationnelle	Environnement	Disponible	Non-disponible
Disponible	Nominal	100	0
Disponible	Non-nominal	99,9	0,1
Non disponible	Nominal	0	100
Non disponible	Non-nominal	0	100

Tableau 33. TPC du nœud « Disponibilité environnée »

De cette façon les conditions environnementales non-nominales causent une diminution de la disponibilité (règle sémantique spécifiée au chapitre 2).

Suite à la construction et au paramétrage du modèle, il est nécessaire de le vérifier - valider, au sens général, pour pouvoir conclure sur la qualité du modèle construit.

5.7. Contribution à la Vérification et la Validation du modèle

Par rapport aux étapes suivies pour construire et paramétrer le modèle, il est logique à ce stade de chercher à évaluer si le modèle créé est bien celui attendu (le bon modèle) pour supporter l'évaluation des stratégies de maintenance. Cette question trouve une réponse à travers la vérification et la validation du modèle.

La vérification est la confirmation par examen et apport de preuves tangibles que les exigences spécifiées ont été satisfaites. Elle répond à la question « construisons-nous correctement le modèle? » Définitions (ISO 8402).

Pour la création des modèles quantifiables de type PRM, nous n'avons pas fait de preuve sur leur construction. Par contre, une première phase qui permet de contribuer à la vérification de la qualité du modèle est l'utilisation des principes génériques approuvés et pérennes (i.e. théorie du système en général) pour sa construction. Cela signifie que nous avons appliqué des règles sémantiques utilisées dans les modèles de représentation de connaissances (chapitre 2) pour construire les relations de dépendances dans les motifs PRM. Les motifs de part leur généralité (pour des instanciations en n exemplaires) et leur fondement sémantique sont un véritable apport à la construction correcte du modèle.

Une deuxième phase pour contribuer à la vérification de notre modèle est l'analyse des distributions de probabilités a priori du réseau. Cette vérification peut renseigner en amont sur :

- des erreurs ou incohérences de modélisation comme des modalités inatteignables dues à des erreurs dans l'attribution des probabilités ou à un non respect des contraintes de non ambiguïté,
- ou des distributions à priori illogiques ou contre-intuitives.

Par exemple, dans notre cas, il est possible de vérifier que lorsque nous ajoutons une évidence sur la variable « efficacité de la logistique » et qu'elle devient à 100% « non-efficace » (c'est-à-dire fausse dans notre modèle), la disponibilité du SP devient à 0% disponible. De même ce n'est pas possible d'être dans la modalité « disponible » du SP (CR_A) lorsque le système de logistique est 100% « non-efficace » (Figure 75).

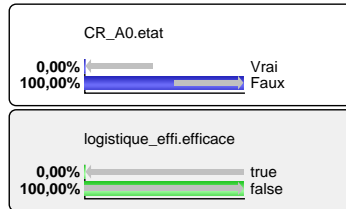


Figure 75. Analyse de la distribution a priori de la variable « efficacité de la logistique »

De plus lorsqu'une évidence est ajoutée sur la non-existence du flux entrant (« Pas » du debit_ingrédient_F0) il ne doit pas avoir de débit sortant, ni de flux conforme ni de SP disponible. Cela correspond au comportement attendu et spécifié dans la section 2.2.2.3 (Figure 76).

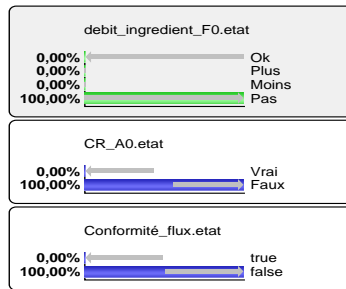


Figure 76. Analyse de la distribution a priori de la variable « débit ingrédient_F0 »

Un troisième test est réalisé lorsque nous ajoutons une évidence sur les ingrédients entrants au processus comme étant déjà contaminés. Cela produit une charge bactérienne supérieure (déviée) entrante et en conséquence une charge bactérienne sortante non-conforme (déviée) (flux_cb_A3524 « false »).

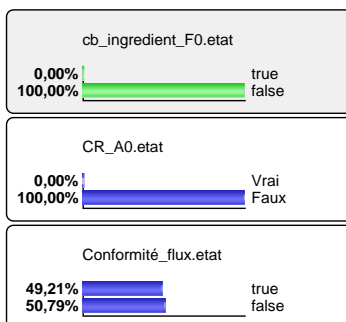


Figure 77. Analyse de la distribution a priori de la variable « charge bactérienne de l'ingrédient_F0 »

En complément à cette vision plutôt de vérification (qui est totalement « hors fonctionnement de l'application » choisie) nous avons donc mené des validations. La validation est la confirmation que par examen et apport de preuves tangibles que les exigences particulières pour un usage spécifique sont satisfaites. Elle répond à la question « construisons nous le bon modèle ? » Définitions (ISO 8402).

Une des techniques de validation utilisée dans notre cas est une technique appelée “vérification et validation indépendante”. Cette technique utilise une tierce entité (third party) pour décider (par tests successifs) de la validité du modèle. L’entité est dans notre cas indépendante de « l’équipe de développement du modèle » puisqu’appartenant à l’entreprise possédant la ligne de production de ferment. Cette entité a exploité le modèle exécutable créé pour comparer des résultats de plusieurs (scénario de) simulations. Cette approche a aidé à la crédibilité du modèle (Sargent, 1996) par retour objectif.

De plus nous avons réalisé une analyse de sensibilité pour mettre en évidence les facteurs (dans le cas de PRM, ce sont les nœuds) qui ont le plus d’influence sur la sortie du modèle et donc, leur importance par rapport aux tests à mener (Mohaghegh, 2007).

Pour réaliser cette analyse, nous observons d’abord quelles sont les variables qui impactent le plus la disponibilité du SP. Nous vérifions alors tous les nœuds connectés au nœud représentant la disponibilité du système « CR_A0 » pour observer quel est le nœud qui a le moins de disponibilité et qui fait diminuer la disponibilité du SP. Dans notre cas, la sous-fonction qui a la disponibilité la plus faible est la fonction A31 « ajuster les paramètres de milieu » à 58,23% (Figure 78).

En continuant cette même logique nous observons quelles sont les variables qui impactent le plus la disponibilité de la fonction « A31 ». Dans cette phase nous trouvons que le flux avec un contenu de CO₂ possède (flux_CO2_A312) la probabilité la plus élevée d’être dans un état non-nominal (Figure 78). D’après les résultats obtenus, l’indisponibilité est donc créée principalement à cause de la déviation du volume du flux « A2 » ou de l’indisponibilité de la cuve (Figure 78).



Figure 78. Causes les plus probables de perte de disponibilité du SP

Pour cette raison nous avons réalisé une analyse de sensibilité de la cible sur la variable « volume du flux A2 ». Cette technique permet de visualiser graphiquement l'impact des différentes variables du réseau sur chaque modalité de la variable cible. La plage de variation de chaque modalité est montrée en fonction de la variation de 0 à 100 % des valeurs de chaque nœud parent (direct ou indirect) (Pollino et al., 2006). De cette façon il est possible d'observer comment la distribution de probabilité à posteriori change sous différentes conditions.

La Figure 79 montre la variation de la modalité « Ok » du volume du flux « A2 » en fonction de la variation de chaque nœud parent.

Nous observons que les nœuds des FOPs n'ont pas beaucoup d'impact sur la sortie du volume du flux. Néanmoins, lorsque les composants dans la partie du processus aval sont disponibles cela permet de conserver un volume du flux en état nominal (ok).

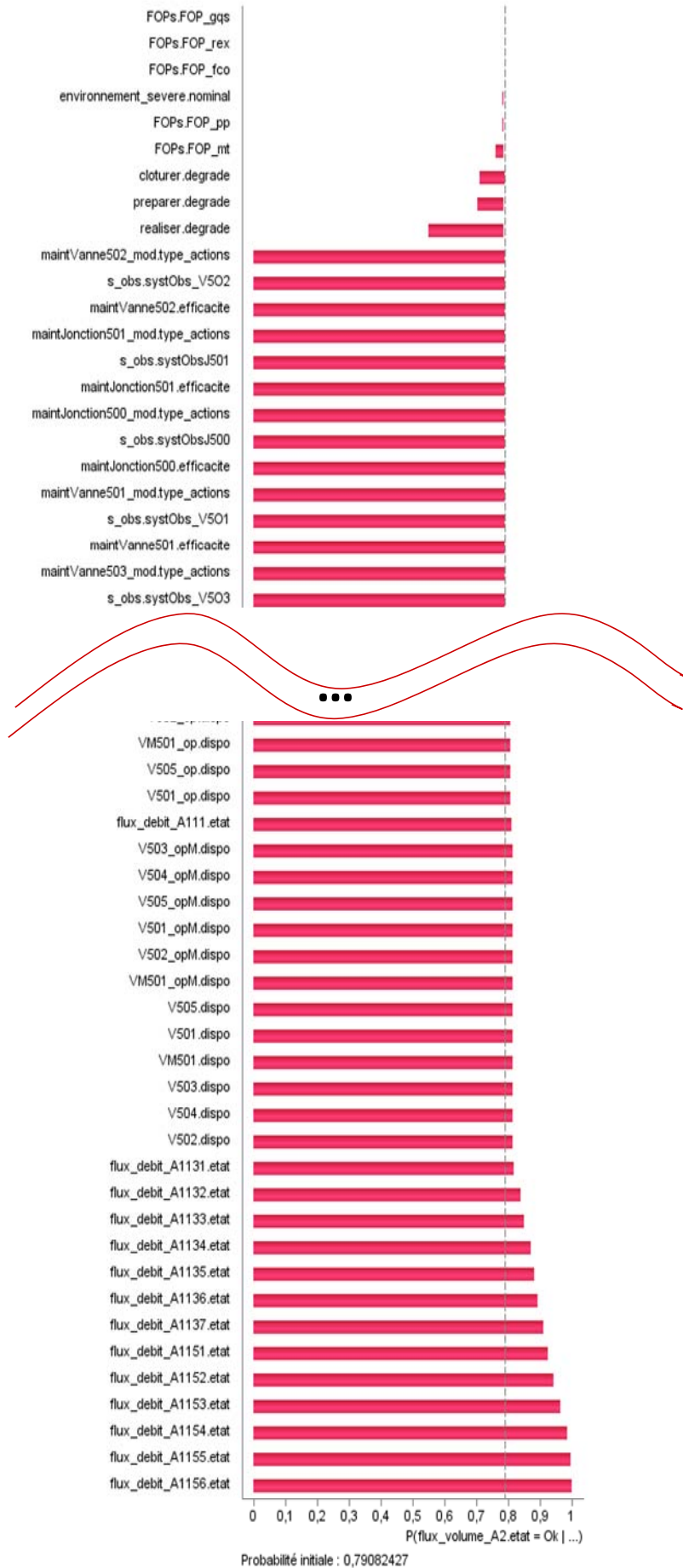


Figure 79. Analyse de sensibilité de la variable « volume du flux A2 » dans la modalité « ok »

La Figure 80 montre la variation des modalités « Plus » et « Moins » du volume du flux « A2 » en fonction de la variation de chaque nœud parent.

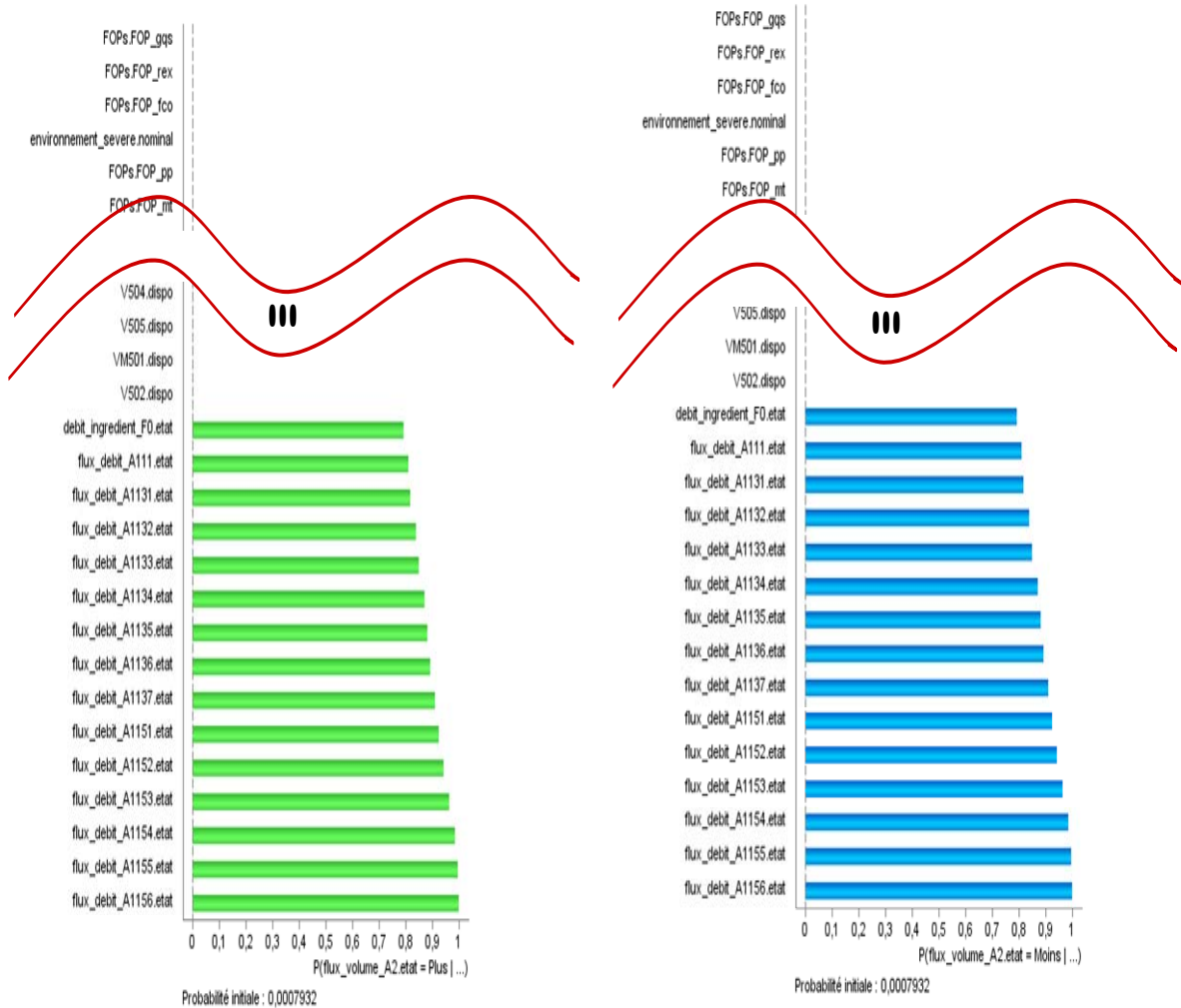


Figure 80. Analyse de sensibilité de la variable « volume du flux A2 » dans les modalités « plus » et « moins »

Dans ce cas, cette analyse correspond aux relations de causalités expliquées dans la section 2.2.2.3. La déviation de « plus » de volume du flux dans le processus est occasionnée par une déviation du débit du flux du même type. Alors si nous avons plus de débit de flux entrant, nous aurons plus de volume du flux. De façon similaire, la déviation de « moins » de volume du flux est provoquée par une déviation de type « moins » de débit du flux entrant dans la cuve.

Ensuite nous illustrons la variation de la modalité « Pas » du volume du flux « A2 » en fonction de la variation de chaque nœud parent (Figure 81).

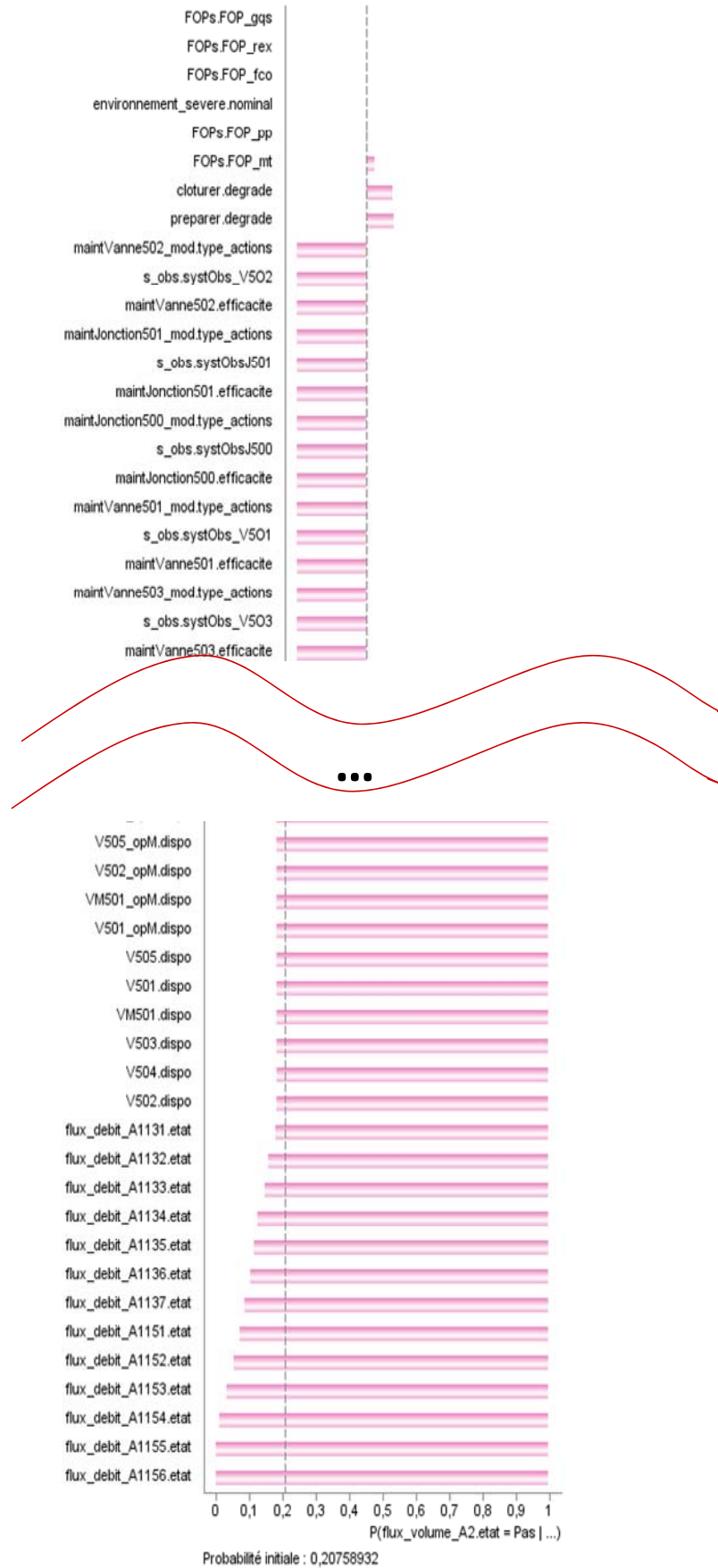


Figure 81. Analyse de sensibilité de la variable « volume du flux A2 » dans la modalité « pas »

Nous observons que cette déviation est impactée principalement soit par la déviation de type « pas » du débit du flux entrant soit par l'indisponibilité des composants supports à ces fonctions et aux fonctions précédentes. De même puisque les facteurs d'aggravations sont très faibles, les FOPs n'ont pas beaucoup d'impact sur ce flux de sortie. Les plans de maintenance de chaque composant ont un impact moyen puisque même si ce n'est pas le plan « optimal », quelque soit le plan, le composant aura des probabilités d'être disponible, soit parce qu'il est réparé de façon corrective ou parce qu'il est entretenu de façon préventive.

A travers ces différentes étapes de validation et vérification, nous avons pu ainsi consolider le degré de confiance que nous accordons à notre modèle par rapport à ce qu'il est censé représenter. Ce degré de confiance a été jugé assez satisfaisant pour réaliser ensuite des simulations sur différentes alternatives en maintenance.

5.8. Exploitation du modèle par rapport à des scénarios

La phase de validation a été poursuivie en exploitant (par exécution) le modèle par rapport à 4 scénarios de simulation mettant en évidence des éléments clés représentatifs de différentes stratégies que la personne tierce a considéré comme réalistes vis-à-vis de l'installation et des pratiques courantes. Les deux premiers scénarios proposent d'évaluer différents types de stratégies de maintenance et les deux derniers prennent en compte l'impact des autres variables associées au plan de maintenance (comme la logistique et l'efficacité du collectif de travail) sur les performances du SP et du SM. La mise en œuvre de chacune des simulations nécessitent des paramétrages spécifiques. En ce sens, le Tableau 34 résume les paramètres initiaux spécifiés dans la section précédente à entrer dans les nœuds racines à chaque simulation ainsi que les paramètres initiaux selon le scénario représenté. Ces paramètres sont spécifiés au sein de chaque classe sur le démonstrateur Skool (de Bayesia). Le modèle Skool est ensuite compilé, permettant ainsi de l'obtenir sous la forme d'un réseau bayésien (sur Bayesialab). Pour obtenir les résultats de chaque simulation en termes probabilistes, une requête est réalisée sur le(s) nœud(s) cible(s), et lors de l'inférence il est possible d'obtenir la distribution jointe du(des) nœud(s) cible(s).

Pour les scénarios 1 (maintenance de la vanne) et 2 (maintenance des joints), les premières simulations n'intègrent que des actions correctives. En revanche les simulations suivantes intègrent d'autres types de maintenance (systématique, conditionnelle, etc). Le troisième scénario vise à évaluer l'impact de l'efficacité de la logistique sur la disponibilité du SP. Pour cela la disponibilité de ressources est amenée à 0,30. Le dernier scénario a comme finalité d'observer l'impact des FOPs sur l'efficacité du collectif de travail ainsi que sur les performances du SP. Pour cela les FOPs sont considérés comme présents (modalité présente = 100%).

- *Scénario 1 : Maintenance de vannes*

Dans cette première simulation les vannes sont soumises à différentes stratégies de maintenance : corrective, systématique à différentes périodicités et conditionnelles. Le Tableau 35 et les Figure 82 et Figure 83 montrent les performances du SP en termes de SdF et financier lors de la réalisation des différentes actions de maintenance sur les vannes. Nous considérons que tous les autres composants sont réparés par des actions correctives uniquement. L'objectif de la simulation vis-à-vis de ce scénario est d'estimer l'impact de

différentes stratégies pour la maintenance de vannes sur la disponibilité du système ainsi que sur les bénéfices de l'entreprise.

Variable	Modalités	Scenario 1 Maintenance de vannes	Scenario 2 Maintenance de Joints	Scenario 3 Efficacité de la logistique	Scenario 4 Efficacité du collectif de travail
Débit ingrédient F0	Ok	99,7	99,7	99,7	99,7
	Nok	0,3	0,3	0,3	0,3
CB ingrédient F0	Ok	99	99	99	99
	Nok	1	1	1	1
Flux (consigne, air...)	Ok	99,7	99,7	99,7	99,7
	Nok	0,3	0,3	0,3	0,3
Disponibilité de ressources	Disponible	99,91	99,91	30,00	99,91
	Non-disponible	0,09	0,09	70,00	0,09
Disponibilité du personnel	Disponible	99,91	99,91	99,91	60
	Non-disponible	0,09	0,09	0,09	40
Fiabilité système d'observation	Détection	96	96	96	96
	Non-détection	1	1	1	1
	Fausse alarme	3	3	3	3
FOPs	Absent	100	100	100	0
	Présent	0	0	0	100
Actions maintenance (première simulation à partir uniquement que des actions correctives)	Corrective parfaite	100	100	100	100
	Corrective minimale	X	X	X	X
	Systematique parfaite	X	X	X	X
	Systematique imparfaite	X	X	X	X
	Conditionnelle parfaite	X	X	X	X
	Conditionnelle imparfaite	X	X	X	X
	Conditionnelle minimale	X	X	X	X

Tableau 34. TPC des nœuds racines des premières simulations sur le modèle globale

Type d'action maintenance	Disponibilité du SP	Bénéfice (VA) (€)	Coûts Cor_vanne (€)	Coûts Pièces rechanges_vanne (€)
Corrective parfaite	0,4347	-4 390 669,50	-6 000 000,00	-750 000,00
Systematique parfaite Tp=3000	0,5858	11 685 825,00	0,00	-1 050 000,00
Systematique parfaite Tp=8500	0,5875	10 875 410,50	-729 000,00	-1 014 615,00
Systematique parfaite Tp=16000	0,4397	5 298 616,50	-2 232 600,00	-938 490,00
Systematique parfaite Tp=25000	0,4269	2 073 593,00	-5 236 200,00	-786 030,00
Conditionnelle parfaite	0,6316	14 684 091,00	-190 200,00	-838 950,00

Tableau 35. Résultats de la simulation du scénario 1

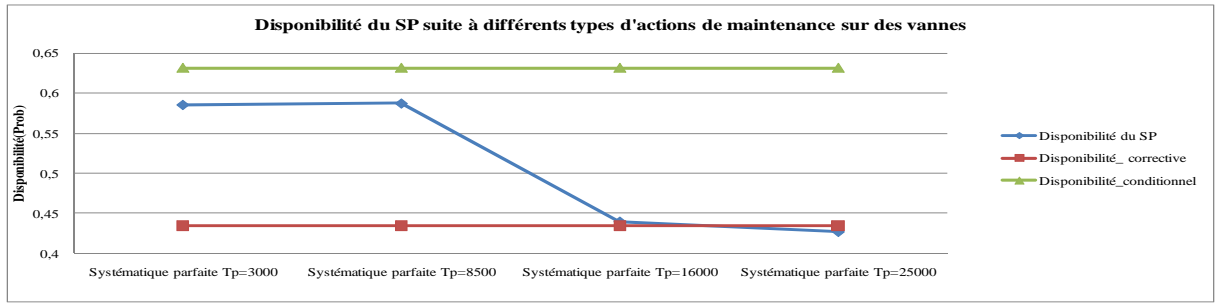


Figure 82. Performances techniques du SP suite à différents types d'actions de maintenance sur des vannes

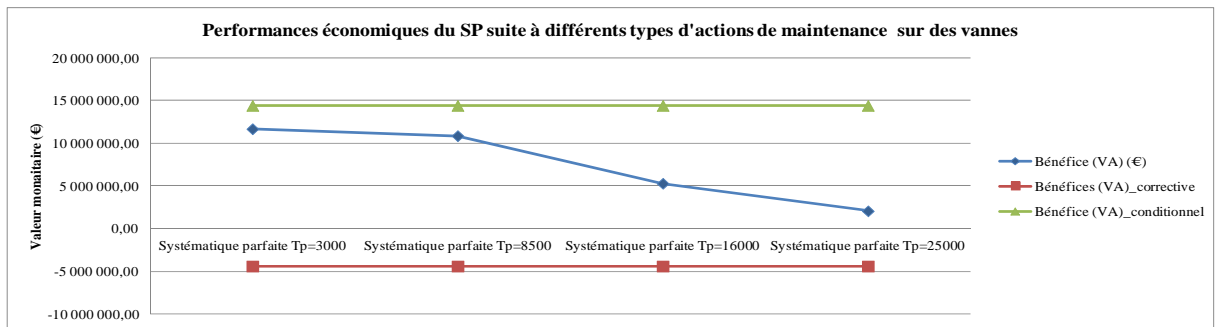


Figure 83. Performances économiques du SP suite à différents types d'actions de maintenance sur des vannes

Les résultats montrent que les performances du SP atteignent leur maximum lors de l'implantation des interventions conditionnelles pour les vannes. Toutefois si nous analysons les autres types d'interventions nous trouvons parfois que la maintenance corrective amène à de meilleurs résultats que la maintenance systématique exécutée à une basse fréquence. Par exemple, la disponibilité à 16000h est similaire à la disponibilité obtenue en appliquant que des actions correctives. La disponibilité inférieure obtenue est à 25000h. Cela s'explique par une maintenance systématique exécutée à une basse fréquence ne pouvant pas réduire le nombre de défaillances et pénalisant la disponibilité du système avec de maintenance préventive non-efficace (les interventions à très basse fréquence diminuent très peu le nombre de défaillances).

Nous observons également que la maintenance systématique à faible périodicité, par exemple à 3000h, conduit à des coûts d'intervention importants (à cause des remplacements fréquents des pièces de rechanges) et en conséquence à des surcoûts (relation de causalité exprimée au chapitre 2). Toutefois, ces surcoûts sont compensés par le gain en disponibilité du SP. Dans ce cadre, même si la stratégie systématique très fréquente amène à des surcoûts (de pièces), elle améliore les bénéfices de l'entreprise par rapport à la stratégie corrective.

Dans le cadre de la maintenance systématique la meilleure performance en terme de disponibilité est à une périodicité autour de $T_p = 8500h$. Toutefois, la meilleure performance en terme économique est à $T_p = 3000h$. Cela s'explique par les coûts de pénalisation lors de l'occurrence d'une défaillance. A 8500h la fiabilité du composant diminue et le composant a plus de risques de tomber en panne qu'à 3000h. Ces pannes occasionnent le rejet du milieu et même si la disponibilité augmente, elle ne compense pas les pertes causées par les défaillances des vannes (Coûts Cor_vanne à 3000h à 0 (€) vs. -729 000,00 (€) à 8500h).

Dans ce scénario nous avons aussi observé la sensibilité des performances de la maintenance conditionnelle par rapport à la fiabilité du système d'observation. Lorsque nous considérons un système d'observation 100% fiable, la disponibilité est de 0,6379, alors qu'en considérant 0,96 de probabilités de bonnes détections, la disponibilité obtenue est de 0,6316. De même, il y a un gain au niveau des bénéfices de 374.905,00 € En ce sens, dans notre cadre la fiabilité du système d'observation n'a pas un grand impact sur les performances du SP. Toutefois, nous considérons surtout des fausses alarmes (probabilité de fausse alarme = 0,03) et elles amènent à des actions préventives non-efficaces et à des surcoûts mais il ne se produit pas de défaillance. Si nous considérons des non-détections l'impact devrait être beaucoup plus important.

- *Scénario 2 : Maintenance de joints*

Ce scénario correspond à la simulation de différentes alternatives de maintenances effectuées sur les joints. Les autres composants sont maintenus avec une stratégie corrective uniquement. Le Tableau 36 et les Figure 84, Figure 85 montrent les résultats de ces simulations.

Type d'action maintenance	Disponibilité du SP	Bénéfice (VA) (€)	Coûts Cor_joints (€)
Corrective parfaite	0,4347	-4 390 669,50	-2 100 000,00
Systématique parfaite Tp=1500	0,4652	4 347 930,50	-1 002 000,00
Systématique parfaite Tp=2500	0,4849	4 904 852,44	-1 010 000,00
Systématique parfaite Tp=5000	0,4772	4 717 255,00	-978 000,00
Systématique parfaite Tp=7000	0,4718	3 458 501,88	-2 079 000,00
Systématique parfaite Tp=10000	0,4446	-207 537,56	-4 951 000,00
Conditionnelle parfaite	0,5152	4 539 473,25	-300 000,00

Tableau 36. Résultats de la simulation du scénario 2

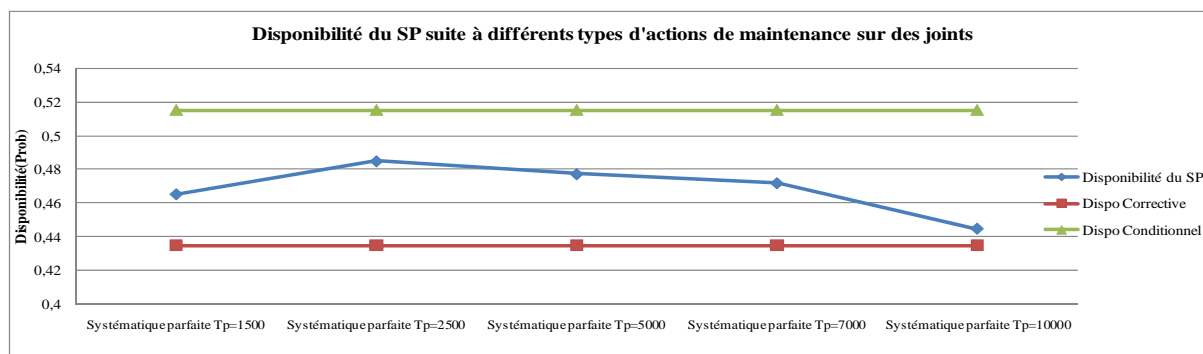


Figure 84. Performances techniques du SP suite à différents types d'actions de maintenance sur des joints

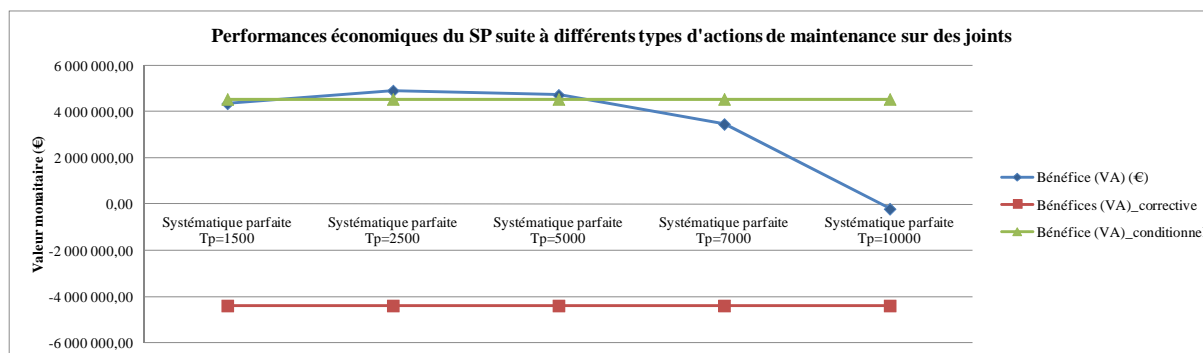


Figure 85. Performances économiques du SP suite à différents types d'actions de maintenance sur des joints

Dans la plage de périodicité que nous avons choisie pour la maintenance systématique, la Figure 84 montre que la disponibilité du SP est améliorée avec la maintenance systématique en comparaison avec la maintenance corrective. Toutefois les actions conditionnelles améliorent nettement la disponibilité obtenue avec les alternatives systématiques et correctives.

En termes économiques, la maintenance systématique réalisée à certaines périodicités aboutit à de meilleurs bénéfices que la maintenance conditionnelle. Cela s'explique à cause des coûts très élevés pour réaliser les analyses de charge bactérienne nécessaires afin de surveiller l'état des joints par exemple. De plus, avec la maintenance conditionnelle des coûts de pénalisation à cause de défaillances sont générés lors des non-détections occasionnant des pertes de ferment. De même si la maintenance systématique est trop fréquente, les coûts de l'ensemble des joints à remplacer sont très faibles et ces remplacements systématiques évitent des défaillances qui occasionnent des pénalités de pertes de production.

- *Scénario 3 : Efficacité du système logistique*

Ce scénario doit permettre d'étudier la sensibilité des performances du SP en fonction de l'efficacité du système de logistique support au SM. Pour cela nous faisons varier la disponibilité des matériaux et outils et nous observons le comportement des coûts ainsi que la disponibilité du SP. Le Tableau 37 illustre les résultats de ces simulations en fonction des différentes disponibilités du personnel.

Disponibilité de matériaux	Disponibilité du SP	Bénéfice (VA) (€)
30	0,0411	-9 104 807
50	0,1069	-7 199 944
100	0,4347	2 358 075

Tableau 37. Résultats de la simulation du scénario 3

D'après les résultats obtenus, le système de logistique a un grand impact sur la disponibilité du SP. En effet, lorsque la disponibilité des ressources diminue, moins d'actions de maintenance peuvent être réalisées dans les délais prévus et en conséquence il y a une perte de disponibilité du SP (règle sémantique spécifiée au chapitre 2). Ce fait met en évidence que lorsque la disponibilité des ressources est à 50%, la disponibilité du SP chute à 10%.

Toutefois, la disponibilité des ressources engendre des coûts de stockage dans l'entreprise. Ces coûts sont compensés par le gain en disponibilité du SP. De cette façon il est possible de produire plus, amenant à une augmentation de bénéfices qui compensent largement les coûts de stockage.

Un autre scénario possible est l'évaluation de la disponibilité du personnel. Tel que précisé précédemment, la disponibilité du personnel a des coûts associés à l'embauche du personnel. Pour cette raison, il peut être intéressant de traiter cet aspect.

- *Scénario 4 : Efficacité du collectif de travail*

Cette simulation a pour objet d'évaluer l'impact des FOPs sur les performances techniques du SP. Ainsi, nous observons comment l'apparition d'un FOP peut affecter l'efficacité du personnel et donc la disponibilité du SP, la qualité et les bénéfices de l'entreprise. En ce sens, nous nous intéressons particulièrement à l'effet que peut avoir la « pression de production » (PP) et la « difficulté à faire vivre un retour d'expérience » (REX) sur la qualité.

Le Tableau 38 montre ces FOPs présents et les performances obtenues lors de la présence de ces FOPs.

Présence FOP	Efficacité du collectif de travail	Disponibilité du SP	Conformité_flux	Bénéfice (VA) (€)
Sans FOPs présents	0,9953	0,4301	0,4914	2 225 053,50
PP	0,9547	0,4193	0,4764	1 909 441,50
PP et REX	0,9508	0,4187	0,4777	1 892 134,50

Tableau 38. Résultats de la simulation du scénario 4

Les résultats montrent que lorsque les FOPs sont présents, le personnel est moins efficace et la disponibilité du SP diminue. En effet, plus les FOPs sont présents, moins la qualité et l'efficacité du personnel sont importants. La diminution dans la qualité peut s'expliquer à cause de la « PP », laquelle peut générer une mauvaise adéquation entre les outils et les tâches à réaliser. Aussi cela peut occasionner du stress dans le collectif de travail amenant à l'omission de certaines tâches de vérification de qualité par exemple. L'absence de retour d'expérience (« REX ») limite la recollection et l'analyse des dysfonctionnements au niveau de la qualité ou autre. Cela empêche la définition des actions efficaces pour la correction des causes-racines qui occasionnent les déviations des attributs du ferment.

De plus par rapport à toutes les autres variables qui interviennent dans les évaluations de stratégies de maintenance, dans notre cas particulier, les FOPs n'ont pas beaucoup d'impact sur la disponibilité du SP. Il est possible d'observer qu'il existe à peine une différence de 2,72% entre la disponibilité sans aucun FOP et la disponibilité avec deux FOPs présents. Cela s'explique par la définition de facteurs d'aggravation très faibles définis par les experts pour chacune des phases d'actions. Toutefois, lorsque l'influence de ces facteurs est considérée comme plus « aggravant » pour chacune de phases, la disponibilité du SP pourrait chuter de façon importante comme montré dans la Figure 86 (disponibilité du SP à 16,43%).

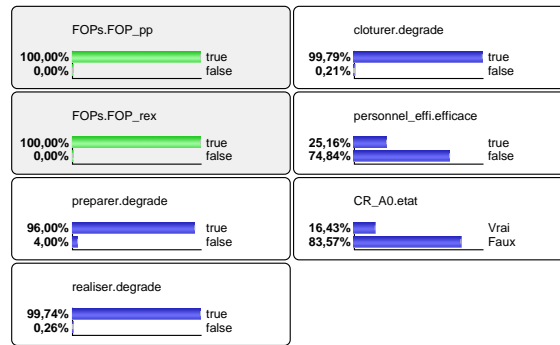


Figure 86. Impact de FOPs sur l'efficacité du collectif de travail et sur la disponibilité du SP

Par rapport aux différents scénarios joués, certains résultats obtenus paraissent difficilement envisageables sans l'apport de la formalisation et de la simulation. Nous pouvons noter entre autres :

- La faible sensibilité des performances économiques et techniques par rapport à la fiabilité du système d'observation dans le cas de maintenance conditionnelle des vannes. Dans ce cas, il faut une étude approfondie pour déterminer si des efforts dans l'amélioration de la fiabilité du système d'observation sont réellement intéressants.
- Dans le cadre de la maintenance de joints, la maintenance systématique peut donner de meilleures performances au niveau économique que la maintenance conditionnelle. De plus, généralement une grande partie des composants apportent des meilleures performances dans le cadre de la maintenance systématique lorsqu'ils s'approchent de leur MUT. Toutefois, ceci n'est pas le cas pour les joints. En effet, les performances économiques dans la maintenance de joints sont améliorées à un temps d'intervention de $T_p = 2500$ alors que le MUT est de 6822 heures.
- Les effets de la présence de certains FOPs dans l'organisation qui amènent à une diminution de la disponibilité, de la qualité et des bénéfices économiques. Ces facteurs sont souvent négligés dans les études d'évaluation des stratégies de maintenance.

Dans cette démarche nous avons analysé la sensibilité des résultats par rapport à certains paramètres (différentes périodicités, différentes disponibilités de ressources, etc.) et cela amène à des résultats cohérents. De plus, pour rendre le modèle un peu plus robuste nous avons séparé les résultats issus d'une analyse de la GMAO, des résultats issus des connaissances d'experts (Figure 87). De cette façon, il y a une partie des résultats qui est indépendante des avis subjectifs.

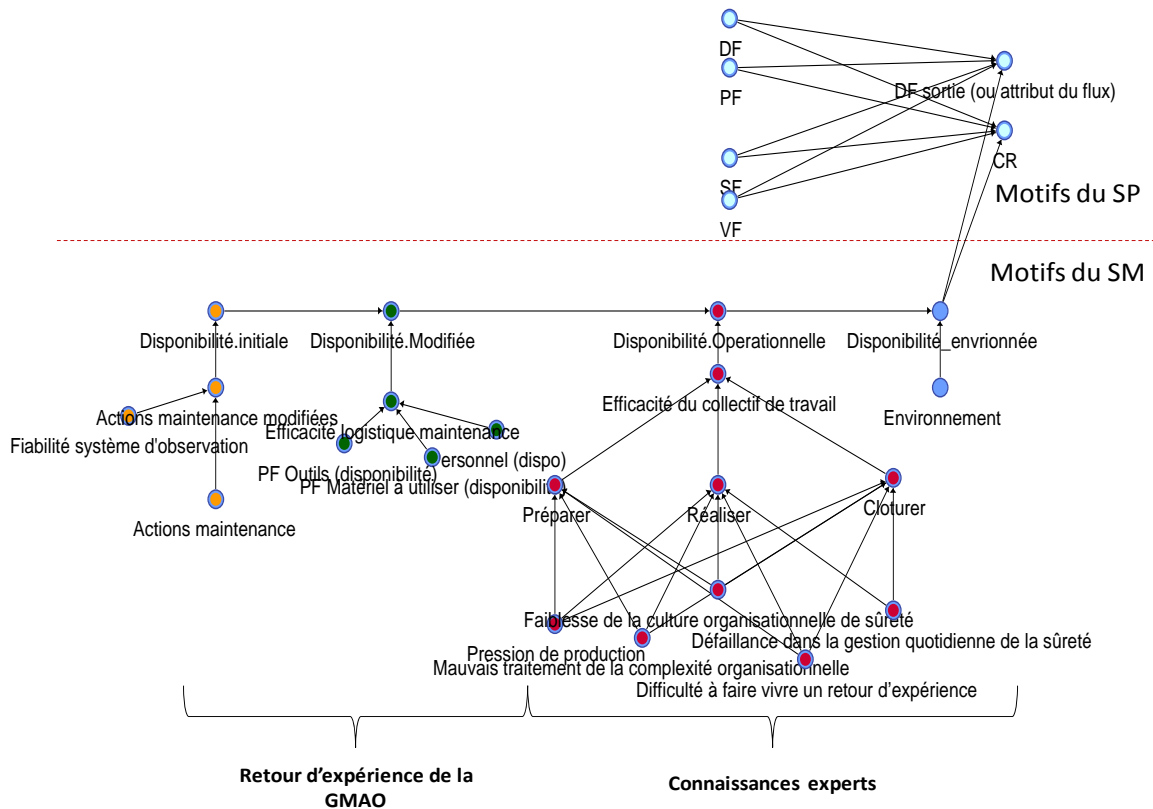


Figure 87. Structuration de motifs pour améliorer la robustesse des motifs PRM

En complément à ces premières alternatives, d'autres simulations sont possibles en évaluant l'impact des différentes stratégies sur les vannes, les filtres et les joints simultanément ainsi que l'impact de l'environnement ou d'autres FOPs par exemple.

5.9. Conclusion

La mise en œuvre de l'ensemble des propositions sur un cas réel d'un processus de fabrication du ferment a permis d'évaluer la faisabilité de la méthodologie proposée dans un cadre industriel.

Par rapport aux besoins d'évaluation des stratégies de maintenance vis-à-vis de leur impact sur les performances clés du système principal, cette application a permis d'obtenir et d'analyser des résultats pour comparer et proposer une classification des alternatives de maintenance (face aux performances attendues).

Ce chapitre a démontré que la méthodologie proposée permet :

- L'instanciation des motifs génériques (à partir des modèles métiers instanciés) facilitant l'intégration des connaissances de diverses natures, certaines de nature technique comme les composants, le plan de maintenance ainsi que les fonctions du SP et d'autres de nature plus qualitative comme l'efficacité du collectif humain et de son contexte organisationnel. De cette façon nous avons utilisé les motifs génériques pour instancier chaque type de composant, que ça soit une cuve, un filtre, une vanne ou autre ainsi que les activités de maintenance (i.e. motif de plan de maintenance) nécessaires pour le MCO du composant.

- Le passage à l'échelle par la construction d'un modèle conséquent à partir d'éléments instanciés.
- La mise en évidence de l'intérêt de la méthodologie dans un cadre industriel ainsi que la valeur ajoutée lors de l'utilisation du modèle pour évaluer les stratégies de maintenance. En ce sens, un partenaire industriel a réalisé différentes simulations pour valider partiellement mais de façon satisfaisante le modèle. Nous avons simulé quatre scénarios et réalisé des comparaisons. Les résultats obtenus sont pour certains non-intuitifs comme l'impact de la fiabilité du système d'observation sur les performances du SP ou l'influence de certaines politiques managériales sur la qualité produite par exemple.

Au global, le développement de cette application nous a permis d'observer l'impact de certaines variables sur les performances du SP, comme par exemple la comparaison entre des stratégies de natures différentes : corrective, systématique et conditionnelle. Dans le cadre de la maintenance systématique nous avons observé comment la fréquence affecte la disponibilité du SP. Il est donc nécessaire de trouver un équilibre dans la périodicité d'interventions, ni trop fréquente car cela engendre trop d'arrêts, ni trop peu fréquente car cela génère des risques de défaillances et donc de possibles coûts de pénalisation. De plus, dans notre exemple, la maintenance conditionnelle n'a pas été toujours la plus efficace au niveau économique. Nous avons pu aussi observer l'importance de la disponibilité des ressources humaines et matérielles sur les performances du SP.

Toutefois, cette application a abouti à l'identification de limites dans le déploiement de la méthodologie proposée. Les limites les plus importantes sont :

1. La représentation des composants par des états binaires: disponible et non-disponible. Le regroupement des états des composants en deux macro-états limite la représentation des états de dégradation. Cela restreint la représentation d'un composant dégradé ainsi que son impact sur les performances du SP. Toutefois, ce choix est fait en tenant compte de la disponibilité des données et connaissances collectées dans le monde industriel.
2. Il n'existe pas une méthodologie formalisée pour l'élicitation d'experts dans les phases de définition de facteurs d'aggravation pour le remplissage des TPC. Le développement d'une méthodologie pour l'élicitation d'experts permettrait d'améliorer la robustesse du modèle ainsi que de diminuer potentiellement l'incertitude associé aux résultats.
3. Le modèle considère des coûts fixes associés à la production et à la maintenance. Toutefois, avec ce type de modèle il n'est pas possible de représenter des dépendances de type économique dans le cadre de la maintenance opportuniste par exemple.

Conclusion générale

Par rapport au contexte global de la maîtrise des performances et exigences d'un système industriel, notre proposition porte sur la définition d'une méthodologie pour la modélisation multipoints de vue du système opérant (ou système principal SP) et de son système de maintenance (SM). Cette méthodologie aboutit au développement d'un modèle unifiant les connaissances sur le SP et le SM et permettant par simulation, l'évaluation des stratégies de maintenance. Ce modèle est construit à partir de l'assemblage de « motifs génériques » (préalablement instanciés au cas applicatif en cohérence avec la particularisation des modèles métiers) et formalisant les relations entre paramètres de stratégies et paramètres du SP.

Ce travail a été initié dans le cadre du projet ANR-SKOOB en généralisant les problématiques maintenance définies par les industriels de ce projet (i.e. système complexe de type centrale de production d'électricité). En ce sens, cette proposition a permis, de façon duale, d'aborder une vision industrielle et scientifique du Maintien en Condition Opérationnelle du SP pour répondre entre autres aux questions suivantes : Comment évaluer quantitativement l'impact d'un programme de maintenance préventive en termes de disponibilité, coûts... ? Comment calculer les effets des conditions d'exploitation sur la disponibilité des systèmes ? (Projet SKOOB, 2011) (Dekker, 1996) (Manseguerra et Zio, 2002) (Zille, 2010). En ce sens, notre proposition est une contribution à :

- la considération de systèmes complexes et multi-composants (Wang et al., 2007) (Zille, 2009).
- la création de règles sémantiques à travers la structuration de connaissances pour représenter les dépendances des variables décisionnelles issues du SP, du SM et de leur interaction. Ces règles rendent notre proposition générique et transposable sur d'autres formalismes de modélisation.
- l'intégration de l'impact de la maintenance sur diverses performances comme la qualité du produit, les coûts, la disponibilité...(Parida, 2006) au sein d'un modèle d'évaluation de stratégies de maintenance.
- l'intégration, au-delà des aspects techniques (e.g. disponibilité du composant, fréquences des interventions) des aspects humains et organisationnels qui impactent également les performances du SP et du SM (Léger et al., 2009, Aven et al., 2006).

En lien avec ces contributions, la plus value scientifique majeure de ce travail de thèse est la formalisation des motifs génériques à base de PRM qui modélisent, par exemple, l'organisation de la maintenance, le plan de maintenance, etc. Ces motifs génériques peuvent être stockés en bibliothèques (composants sur étagère, COTS) et utilisés pour définir un modèle particulier à partir d'une phase d'instanciation des motifs au cas traité puis d'assemblage des motifs instanciés. Ce principe de généricité – instanciation permet la capitalisation et la réutilisation aisée des motifs du modèle sur des cas applicatifs nombreux et variés. En effet, le choix des PRM pour la modélisation de ces motifs se justifie par leur capacité à modéliser les connaissances à travers une

structure de type orientée objet. Il est ainsi possible d'estimer l'impact de l'état d'une variable aléatoire (en la propageant par des relations de causes à effets) sur le système afin de réaliser des prédictions ainsi que du diagnostic. En ce sens, nous avons pu montrer que le langage de modélisation « Skool » auquel nous avons contribué et qui a été développé dans SKOOB pour supporter les PRM, permet la représentation d'une grande partie des connaissances nécessaires pour les évaluations de stratégies de maintenance.

Les règles sémantiques, sur lesquelles ces motifs sont construits, résultent d'un ensemble de modèles métiers formalisant les connaissances d'un plan de maintenance et de son organisation, ainsi que les interactions entre le SP et le SM. Cette formalisation est basée, entre autres, sur la théorie du système général conduisant à représenter un système à travers différents points de vue cohérents et complémentaires. Pour représenter ces points de vue, nous utilisons différents modèles de structuration de connaissance comme SADT pour la vue fonctionnelle, AMDEC/HAZOP pour la vue dysfonctionnelle et le diagramme de classe pour la vue informationnelle.

En termes de validation, la méthodologie proposée a été déployée sur un cas industriel réel qui est une ligne de fermentation. L'objectif était de démontrer son applicabilité après passage à l'échelle de la modélisation mais aussi d'évaluer la pertinence et le bénéfice de la méthodologie vis-à-vis de l'objectif initial de choix d'une stratégie de maintenance. Cette première procédure applicative doit être déployée sur d'autres cas industriels pour tirer des conclusions plus généralistes mais aussi pour évaluer l'appropriation possible de cette démarche-outil par le monde industriel ce qui a déjà été initiée dans SKOOB et facilitée par l'outillage de la méthodologie (Skool, Bayesialab). Cette première application a aussi permis d'identifier certaines limites à la modélisation comme la non-représentation multi-états des composants ou la non-prise en compte des dépendances économiques.

Au delà de ces limites, plusieurs investigations scientifiques sont envisageables, à court terme, pour rendre la proposition méthodologique plus pertinente :

- Le principe de sous-traitance devrait être aussi formalisé dans les motifs afin de prendre en compte son impact sur l'efficacité du personnel et de la logistique. Ainsi d'autres facteurs peuvent être intégrés comme l'impact des facteurs environnementaux sur l'humain (i.e. température, humidité, luminosité, etc.) ou les dépendances de types structurels sur des composants (Lai, 2007) et (Cho et Parlar, 1991).
- L'évaluation de la qualité des estimations obtenues devrait être intégrée à travers de l'estimation de l'incertitude épistémique. Des travaux ont déjà été initiés, en ce sens, par (Simon et Weber, 2009).

A plus long terme, d'autres axes de recherches peuvent être explorés pour compléter certains aspects de la méthodologie proposée :

- Par rapport à la modélisation, notre méthodologie exploite un modèle probabiliste dont les variables sont considérées « statiques ». Ce modèle devrait évoluer vers une prise en compte de l'aspect dynamique des variables évoluant dans le temps (Boudali et Dugan, 2005). Ceci permettra une modélisation plus fine de certains phénomènes comme la dégradation ou des facteurs environnementaux (temps de service, nombre de sollicitations,

etc.). Des formalismes de type « two-time sliced bayesian networks » (2TBN) (Weber et Jouffe, 2006) (Weber et al., 2004) ou « continuous time bayesian networks » (CTBN) semblent adaptés pour représenter cette dynamique. Cependant l'intégration de l'aspect dynamique pour les RB nécessite d'apporter des réponses à la gestion de la complexité calculatoire induite par les dépendances récursives. Actuellement cela constitue un axe de recherche en soi.

- Dans notre proposition nous avons choisi la voie de l'intégration des connaissances au sein d'un même formalisme (PRM). Toutefois, il peut être judicieux, pour minimiser les pertes sémantiques liées à l'unification, d'investiguer la voie de l'interopération entre les différents modèles métiers (plutôt statiques) issus de l'analyse multipoints de vue d'un système, avec des modèles de nature plus dynamique, capable de supporter la simulation et l'évaluation.
- Le déploiement de la méthodologie sur d'autres applications doit permettre de conforter la phase de validation en éprouvant le modèle par passages à l'échelle multiples et mise en simulation avec évaluation des résultats en regard des performances – exigences attendues. Ce déploiement devrait aussi se faire sur un benchmark avec comparaison des résultats de notre approche vis-à-vis d'une référence pour conclure quant à la qualité du modèle exécutable construit et donc des motifs proposés.

Publications de l'auteur

Revue internationale avec comité de lecture et actes

Weber, P., **Medina-Oliva, G.**, Simon, C., & Iung, B. (2010). *Overview on Bayesian networks Applications for Dependability, Risk Analysis and Maintenance areas*. Engineering Applications of Artificial Intelligence on Dependable System Modelling and Analysis. Available online 16 July 2010.

Conférences internationales avec comité de lecture et actes

Medina-Oliva, G., Weber, P., Levrat, E., & Iung, B. (2010). *Use of Probabilistic Relational Model (PRM) for Dependability Analysis of Complex Systems*. Preprints in 12th LSS IFAC symposium Large Scale Systems: theory and applications, Villeneuve d'Ascq, France.

Medina-Oliva G., Weber P., Levrat E., Iung B., (2009). *Probabilistic Relational Model (PRM)_based Technical Knowledge Formalization for Dependability of an Industrial System*. Proceedings in 7th Workshop on Advanced Control and Diagnosis ACD'2009, Vielona Gora, Pologne.

Medina-Oliva G., Weber P., Simon C., Iung B., (2009). *Bayesian Networks Applications on Dependability, Risk Analysis and Maintenance*. Proceedings in 2nd IFAC Workshop on Dependable Control of Discrete Systems, 245-250, Bari, Italy.

Conférence nationale avec comité de lecture et actes

Medina-Oliva G., Weber P., Iung B., (2011). *Modélisation du système de maintenance industriel et de son environnement technique, humain et organisationnel par Réseaux Bayésiens pour l'évaluation des stratégies de maintenance*, 4èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS, 9-10 Juin 2011, Marseille - France, 2011.

Communication sans actes

Medina-Oliva G., Weber P., Levrat E., Iung B., (2010). Probabilistic Relational Model (PRM)_based Technical Knowledge Formalization for Maintenance Strategy Assessment of Industrial Systems. Doctoral Spring Workshop "Product and Asset Lifecycle Management" (PALM - DSW) 2010, Seville, Espagne.

Medina-Oliva G., Weber P., Levrat E., Iung B., (2011). Use of Bayesian Networks (BN) to Assess Maintenance Strategies of Complex Systems. Doctoral Spring Workshop "Product and Asset Lifecycle Management" (PALM - DSW) 2011, Rosière, France.

Rapports de contrat

Weber, P., Simon, C., **Medina Oliva G.** (2008). *Analyse des références en RB / Mdr-SdF : 7000 références sur les 10 dernières années* (Rapport ANR SKOOB). Vandoeuvre les Nancy, France: CRAN-Nancy Université- CNRS UMR 7039.

Medina-Oliva, G., Weber, P., Iung, B., Levrat, E., & Simon, C. (2008). *Cahier des charges fonctionnel d'un outil d'évaluation des stratégies de maintenance* (Rapport ANR SKOOB). Vandoeuvre les Nancy, France: CRAN-Nancy Université- CNRS UMR 7039.

Medina-Oliva, G., Weber, P., Iung, B., Levrat, E., & Simon, C. (2009). *Outils de représentation des différents points de vue d'un système industriel* (Rapport ANR SKOOB). Vandoeuvre les Nancy, France: CRAN-Nancy Université- CNRS UMR 7039.

Medina-Oliva G., Weber, P., Iung, B., Levrat, E., & Simon, C. (2009). *Formalisation et Intégration des connaissances d'un système industriel* (Rapport ANR SKOOB). Vandoeuvre les Nancy, France: CRAN-Nancy Université- CNRS UMR 7039.

Bibliographie

Adam, E. E. jr. and eight other authors. (1997). *An International Study of Quality Improvement Approach and Firm Performance*. International Journal of Operations & Production Management, Vol. 17, No. 9, pp. 842-873.

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

AFNOR NF X50-151. (2007). *Management par la valeur - Expression Fonctionnelle du Besoin et cahier des charges fonctionnel - Exigences pour l'expression et la validation du besoin à satisfaire dans le processus d'acquisition ou d'obtention d'un produit*. Association Française de Normalisation, Paris.

Al-Najjar B., Alsyouf I. (2003). *Selecting the most efficient maintenance approach using fuzzy multiple criteria decision making*. International Journal of Production Economics Volume 84, Issue 1, Pages 85-100.

Alsyouf, I. (2007). *The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability*. International Journal of Production Economics, 105, 70–78.

Alting,L. and Legarth, J.B. (1995). *Life Cycle Engineering and Design*. Annals of CIRP, vol.44, no.2: 569-580.

Angel S. (1977). *A Pattern Language*. Oxford University Press, New York.

Arunraj, N. S., & Maiti, J. (2007). *Risk-based maintenance – techniques and applications*. Journal of Hazardous Materials, 142(3), 653–661.

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

B.S. Dhillon. (1999). *Design reliability*, CRC press.

Barlow R.E. et Hunter L.C. (1960). *Optimum preventive maintenance*. Operations Research 8. 90-100.

Barlow R.E. et Proschan F. (1965). *Mathematical Theory of Reliability*. New York: John Wiley & Sons.

Barros A., Bérenguer C., Grall A. (2009). *A maintenance policy for two-unit parallel systems based on imperfect monitoring information*. Reliability Engineering and System Safety 91 (2006) 131–136.

Bartholomew-Biggs M., Zuo M., Li X. (2009). *Modelling and optimizing sequential imperfect preventive maintenance*. Reliability Engineering and System Safety 94 53– 62.

Bashiri M., Badri H., Hejazi T. (2011). *Selecting optimum maintenance strategy by fuzzy interactive linear assignment method*. Applied Mathematical Modelling Volume 35, Issue 1, Pages 152-164.

-
- Basseville M. and Nikiforov I. (1997). *Detection of abrupt changes: theory and application*. Prentice Hall Information and System Sciences series. ISBN 0-13-126780-9.
- Ben-Daya M. (2009). *Failure Statistics*. Handbook of Maintenance Management and Engineering. Springer.
- Bernus P. et Nemes L. (1996). *A framework to define a generic enterprise reference architecture and methodology*. Computer Integrated Manufacturing Systems Volume 9, Issue 3, Pages 179-191.
- Bevilacqua M, Braglia M. (2000). *The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection*. Reliability Engineering System Safety;70(1): 71–83.
- Birolini A. (1999). *Reliability Engineering—Theory and Practice*, Springer, Berlin.
- Bordes L., Paroissin C., Salami A. (2009). *Un modèle de dégradation basé sur un processus gamma et le mouvement brownien*. 41èmes Journées de Statistique, SFdS, Bordeaux, Bordeaux, France.
- Borgia O., De Carlo F., Peccianti M., Tucci M., (2009). *The Use of Dynamic Object Oriented Bayesian Networks in Reliability Assessment: a Case Study*. Recent Advances in Maintenance and Infrastructure Management. Springer-Verlag London Limited. London, England.
- Borgonovo E., Marseguerra M., Zio E. (2000). *A Monte Carlo methodological approach to plant availability modeling with maintenance, aging and obsolescence*. Reliability Engineering & System Safety. Volume 67, Issue 1, Pages 61-73.
- Boudali H., Dugan J.B. (2005b). *A discrete-time Bayesian network reliability modeling and analysis framework*. Reliability Engineering and System Safety. 87(3), 337-349.
- Byington C.S., M.J. Roemer, G.J. Kacprzyński et T. Galie (2002). *Prognostic Enhancements to Diagnostic Systems for Improved Condition Based Maintenance*. 2002 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, USA.
- C. Alexander, S. Ishikawa, M. Silverstein, M. Jacobson, I. Fiksdahl-King, and S. Angel. *A Pattern Language*. Oxford University Press, New York, 1977.
- Castanier, B., Grall A., et Bérenguer C. (2005), *A condition-based maintenance policy with non-periodic inspections for a two-unit series system*, Reliability Engineering & System Safety, 87, 109-120.
- CEI 60300-3-14. (2004). Norme Européen. *Gestion de la sûreté de fonctionnement*. Association Française de Normalisation (AFNOR), Paris.
- Celeux G., Corset F., Lannoy A., Ricard B. (2006) *Designing a Bayesian network for preventive maintenance from expert opinions in a rapid and reliable delay*. Reliability Engineering and System Safety. 91(7), 849-856.
- Chelbi A. et Ait-Kadi D. (2009). *Inspection Strategies for Randomly Failing Systems*. Handbook of Maintenance Management and Engineering. Springer Verlag London Limited.

-
- Chen D., Doumeingts G., F. Vernadat. (2008). Architectures for enterprise integration and interoperability : past, present and future. *Computers in Industry* 59, 647-659.
- Cheng Y., Tsao H. (2010). *Rolling stock maintenance strategy selection, spares parts' estimation, and replacements' interval calculation*. *International Journal of Production Economics*. Volume 128, Issue 1, Pages 404-412.
- Cho, D., Parlar,M.: *A survey of maintenance models for multi-unit systems*. *Eur. J. Oper. Res.* 51, 1–23. 1991.
- Clavareau J., Labeau P-E. *A Petri net-based modelling of replacement strategies under technological obsolescence*. *Reliability Engineering and System Safety*. Volume 94, 357-369. 2009.
- Clavareau. (2008). *Modélisation des stratégies de remplacement de composants et de systèmes soumis à obsolescence technologique*. Doctorat de l'Université Libre de Bruxelles.
- Cocheteux, C. (2010). *Contribution à la maintenance proactive par la formalisation du processus de pronostic des performances des systèmes industriels*. Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I.
- Cooper, R. and R. S. Kaplan (1992). Activity-based systems: Measuring the costs of resource usage. *Accounting Horizons*, 6 (3), 1-13.
- Crespo Marquez, Sánchez Heguedas. (2002) *Models for maintenance optimization: a study for repairable systems and finite time periods*. *Reliability Engineering & System Safety*. Volume 75, Issue 3, Pages 367-377.
- Crespo-Márquez A. (2008). *The maintenance management framework: models and methods for complex systems maintenance*. Springer Series in Reliability Engineering ISBN-10:1846288207.
- Dal B, Tugwell P, Greatbanks R. (2000). *Overall equipment effectiveness as a measure for operational improvement*. *International Journal of Operations and Production Management* 20(12): 1488–1502.
- David P. (2009). *Contribution à l'analyse de sûreté de fonctionnement des systèmes complexes en phase de conception : application à l'évaluation des missions d'un réseau de capteurs de présence humaine*. Doctorat de l'Université d'Orléans.
- De Melo A.C.V., Sanchez A.J. (2008). *Software maintenance project delays prediction using Bayesian Networks*. *Expert Systems with Applications*, In Press, Volume 34, Issue 2. Pages 908-919.
- De Souza E., Ochoa P.M. (1992). *State space exploration in Markov models*. *Performance Evaluation Review*. 20(1), 152-166.
- De Toni, A., Tonchia, S., (2001). *Performance measurement systems: Models, characteristics and measures*. *International Journal of Operations & Production Management* 21 (1/2), 46–70.

-
- Deeb, S. (2008). *Contribution méthodologique à la maîtrise conjointe de la qualité d'un produit et de ses processus de production par une modélisation des concepts qualité*. Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I.
- Dekker R. et Scarf PA. (1998). *On the impact of optimisation models in maintenance decision making: the state of the art*. Reliability Engineering and System Safety: 60(2): 111–119.
- Dekker R. (1996). *Applications of maintenance optimization models: review and analysis*. Reliability Engineering and System Safety, 51:229-40.
- Dekker R. et Wildeman R. (1997). *A Review of Multi-Component Maintenance Models with Economic Dependence*. Mathematical Methods of Operations Research 45:411-435.
- Delmotte F. (2003). *A socio-technical framework for the integration of human and organizational factors in project management and risk analysis*. Master of science, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Deloux E., Castanier B. and Bérenguer C. (2009). *Predictive maintenance policy for a gradually deteriorating system subject to stress*. Reliability Engineering and System Safety 94 418– 431.
- Dhillon B.S. (1999). *Engineering maintainability: how to design for reliability and easy maintenance*, Gulf Publishing, Houston (TX, USA).
- Dhillon B.S. (2009). *Human Reliability and Error in Maintenance*. Handbook of Maintenance Management and Engineering. Springer. Part VII, 695-710.
- Dhillon, B.S. (1999). *Engineering Maintainability*. Gulf Publishing Company.
- Dhillon, B.S. and Liu, Y. (2006). *Human Error in Maintenance: A Review*. Journal of Quality in Maintenance Engineering. 12(1): 21-36.
- Doyen L., Gaudoin O. (2004). *Classes of imperfect repair models based on reduction of failure intensity or virtual age*. Reliability Engineering & System Safety. Vol. 84, No. 1, pp 45-56.
- Durairaj S.K., Ong S.K., Nee A.Y.C. et Tan R.B.H. (2002). *Evaluation of Life Cycle Cost Analysis Methodologies*. Corporation Environment Strategy, Vol. 9, No. 1, pp30-39.
- Dutuit Y., Chatelet E., Signoret J.P. & Thomas P. (1997). *Dependability modelling and evaluation by using stochastic Petri nets : application to two test cases*. Reliability Engineering and System Safety, 55, 117-124.
- Filip F.-G. et Leiviskä K.. (2009). Large-scale complex systems. In S. Y. Nof, editor, Springer Handbook of Automation.
- Fougerousse S., Germain J. (1992). *Pratique de la maintenance industrielle par le coût global*, Paris, Editions AFNOR.
- Fouladirad M., Grall A., Dieulle L. (2008) . *On the use of on-line detection for maintenance of gradually deteriorating systems*. Reliability Engineering and System Safety 93 1814– 1820.

-
- Fowler M. (2003). *UML Distilled: a brief guide to the standard object modeling language*. In: Object technology, 3rd edn. Addison- Wesley Professional, Reading.
- Franchini, L., E. Caillaud et G. Lacoste. (1997). *Conduite des systèmes industriels de type PME/PMI : Problématique, état de l'art et pistes de recherche*. In proceedings of the deuxième Congrès International Franco-Québécois « Le génie industriel dans un monde sans frontière », France.
- Friedenthal S., Steiner R., et Moore A. C. (2008). *Practical Guide to SysML: The Systems Modeling Language*. Elsevier Science.
- Getoor, Lise, Nir Friedman, Daphne Koller, Avi Pfeffer, and Ben Taskar. (2007). *Probabilistic relational models*. In Introduction to statistical relational learning Cambridge: MIT Press., chap. 5, 129-174.
- Gonzales C. et Wuillemin P.H. (2011). *PRM inference using Jaffray & Fay's Local Conditioning*. Theory and Decision. Springer. Volume 71, Number 1, 33-62.
- Grall A., C. Bérenguer, L. Dieulle. (2002). *A condition-based maintenance policy for stochastically deteriorating systems*. Reliability Engineering and System Safety 76 (2) 167–180.
- Grall A., Dieulle L., Bérenguer C. and Roussignol M. (2002). *Continuous-time predictive-maintenance scheduling for a deteriorating system*. IEEE Trans Reliab 51 (2), pp. 141–150.,
- Gürler et Kaya (2002). *A maintenance policy for a system with multi-state components approximate solution*. Reliability Engineering and System Safet. 76: 117-127.
- Ho-Joon Sung. (2008). *Optimal maintenance of a multi-unit system under dependencies*. PhD. These in the School of Aerospace Engineering Georgia Institute of Technology.
- Hoyland, A. and M. Rausand (1994). *System Reliability Theory: Models and Statistical Methods*. Wiley, John & Sons, Incorporated.
- Hu H., Cheng G., Li Y., Tang Y. (2009). *Risk-based maintenance strategy and its applications in a petrochemical reforming reaction system*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 22 392-397.
- IEC/ISO62264-1. (2003). *Enterprise-control system integration - Part 1: Models and terminology*. Edition ISO.
- International Council on Systems Engineering (INCOSE). (2010). *System Engineering Handbook v.3.2*. San Diego, USA.
- ISO 8402. (1994). *Management de la qualité et assurance de la qualité*. Edition ISO.
- Iung B., Veron M., Suhner M. and Muller A. (2005). *Integration of maintenance strategies into prognosis process to decision making aid on system operation*. Annals of the CIRP. 54 (1), 5-8.
- Jardine A. et Tsang A. (2005). *Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications*. Taylor and Francis/CRC press.

-
- Jardine A., Lin D., Banjevic D. (2006). *A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance*. Mechanical Systems and Signal Processing 20 1483–1510.
- Jayal, A.D.; Badurdeen, F.; Dillon, O.W., Jr.; Jawahir, I.S. (2010). *Sustainable manufacturing: Modeling and Optimization challenges at the product, process and system levels*. CIRP J. Manuf. Sci. Technol. 3, 144–152.
- Jayantha P. Liyanage, Fazleena Badurdeen, R.M. Chandima Ratnayake. (2009). *Industrial Asset Maintenance and Sustainability Performance: Economical, Environmental, and Societal Implications*. Handbook of Maintenance Management and Engineering. Springer Verlag London Limited.
- Jensen F.V. (1996). *An Introduction to Bayesian Networks*. Editions UCL Press. London, UK.
- Kallena M.J., van Noortwijk J.M. (2005). Optimal maintenance decisions under imperfect inspection. Reliability Engineering and System Safety 90 177–185.
- Kang C.W., Golay M.W. (1999). *A Bayesian belief network-based advisory system for operational availability focused diagnosis of complex nuclear power systems*. Expert Systems with Applications. 17, 21-32.
- Kaplan RS, Norton DP, (1992) *The Balanced Scorecard - measures that drive performance*. Harvard Business Review, 70(1): 71-9.
- Kiassat C., Safaei N. (2009). *Integrating Human Reliability Analysis Into a Comprehensive Maintenance Optimization Strategy*. Paper presented at WCEAM, Athens, Greece, September 27-October 1.
- Kijima, M., Morimura, H. and Suzuki, Y. (1988). *Periodical replacement problem without assuming minimal repair*. European Journal of Operational Research 37/2, 194-203.
- Kiker,G. A., Bridges, T. S., Varghese, A., Seager, T. P.,&Linkov, I. (2005). *Application of multicriteria decision analysis in environmental decision making*. Integrated Environmental Assessment and Management, 1, 95–108.
- Kim M.C, Seong P.H., Hollnagel E. (2006). *A probabilistic approach for determining the control mode in CREAM*. Reliability Engineering and System Safety. 91(2), 191-199.
- Kleindorfer PR, Singhal K, Van Wassenhove LN. (2005). *Sustainable operations management*. Production and Operations Management; winter, 14(4):482–492.
- Knezevic J . Maintainability and System Effectiveness (2009). *Handbook of Maintenance Management and Engineering*. Springer Series in Reliability Engineering ISBN978-1-84882-471-3.
- Knezevic, J., L. Papic and B. Vasic. (1997). *Sources of fuzziness in vehicle maintenance management*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 3 (4), pp. 281–28.
- Koller D. and Pfeffer A. (1998). *Probabilistic frame-based systems*. Proceedings of the 15th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI), Madison, Wisconsin.

- Kothamasu R., Huang S. et VerDuin W. (2006). *System health monitoring and prognostics — a review of current paradigms and practices*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Volume 28, Numbers 9-10, 1012-1024.
- Laggoune R., Chateauneuf A., Aissani D. (2009). *Opportunistic policy for optimal preventive maintenance of a multi-component system in continuous operating units*. Computers and Chemical Engineering 33 1499–1510.
- Lai M-T. (2007). *A discrete replacement model for a two-unit parallel system subject to failure rate interaction*. Quality & Quantity. Volume 43, Number 3. 471-479.
- Langseth H. (2008). *Bayesian Networks in Reliability: The Good, the Bad and the Ugly*. Advances in Mathematical Modeling for Reliability. IOS Press. Amsterdam, Netherland.
- Langseth H., Portinale L. (2007). *Bayesian networks in reliability*. Reliability Engineering and System Safety. 92(1), 92-108.
- Latorell, K.A. and Prabhu, P.V. (2000). *A review of human error in aviation maintenance and inspection*. International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 26, pp. 133-61.
- Lee C. and Lee K.J. (2006). *Application of Bayesian network to the probabilistic risk assessment of nuclear waste disposal*. Reliability Engineering and System Safety. 91, 515–532.
- Léger A., Weber P., Levrat E., Duval C., Farret R., Iung B. (2009). *Methodological developments for probabilistic risk analyses of socio-technical systems*. Journal of Risk and Reliability, volume 223 (number 4/2009), pages 313-332.
- Léger A., Weber P., Levrat E., Duval C., Farret R., Iung B. (2009). *Methodological developments for probabilistic risk analyses of socio-technical systems*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, volume 223 (number 4/2009), pages 313-332.
- 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 I.
- 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 I.
- Levrat E., B. Iung et A. Crespo Marquez. (2008). *E-maintenance: review and conceptual framework*. Production Planning & Control, vol. 19 (4), pp. 408–429.
- Liao H., E. Elsayed A., et Chan L-Y.. (2006). *Maintenance of continuously monitored degrading systems*. European Journal of Operational Research, vol. 75, no. 2, pp. 821-835.
- Lin D., Zuo M., Yam R. (2000). *General Sequential Imperfect preventive maintenance models*. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering Vol. 7, No. 3 253-266.
- Liyanage J. P. (2004). *Sustainability business case for maintenance in offshore oil and gas production assets: Experience from North Sea*. In Proceedings of the 17th European Maintenance Congress: Euromaintenance, Barcelona, Spain, pp. 309-314.

Lock, M.W.B., Strutt, J.E.. (1985). *Reliability of In-Service Inspection of Transport Aircraft Structures* (Report 85013). Civil Aviation Authority, London.

Longo, A., & Motta, G. (2006). *Design processes for sustainable performances: A model and a method*. In LNCS: Vol. 3812. BPM 2005 workshops (pp. 399–407). Berlin: Springer.

Luo J., Namburu M., Pattipati K., Qiao L., Kawamoto M. et Chigusa S. (2003). *Model based prognostic techniques*. AUTOTESTCON 2003 Proceedings, IEEE Systems Readiness Technology Conference, Anaheim, Californie.

Luo J., Pattipati K.R., Qiao L. et Chigusa S. (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.

Lyonnet, P. (1991). *Maintenance Planning - Methods and Mathematics*, Chapman & Hall, London.

M. Yanez, F. Joglar, and M. Modarres. (2002). *Generalized renewal process for analysis of repairable systems with limited failure experience*. Reliability Engineering and System Safety, vol. 77, pp. 167–180.

Machine Information Management Open System Alliances (MIMOSA). (2009). www.mimosa.org.

Mahadevan S., Zhang R., Smith N. (2001). *Bayesian networks for system reliability reassessment*. *Structural Safety*. 23(3), 231- 251.

Marseguerra M., Zio E. (2002). *Condition-based maintenance optimization by means of genetic algorithms and Monte Carlo Simulation*. Reliability Engineering and System Safety. 77 151–166.

Marseguerra, Zio et Podofillini. (2002). *Condition-based maintenance optimization by means of genetic algorithms and Monte Carlo simulation*. Reliability Engineering and System Safety 77 151–166.

Mateos, J. (2000). *La traçabilité, un moyen pour des objectifs*. In: Seconde conference SEE/FBF-ISA, Hôtel Méridien Part-Dieu, Lyon, France.

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 I.

Medina-Oliva G., Weber P., Iung B., (2011). *Modélisation du système de maintenance industriel et de son environnement technique, humain et organisationnel par Réseaux Bayésiens pour l'évaluation des stratégies de maintenance*, 4èmes Journées Doctorales / Journées Nationales MACS, 9-10 Juin 2011, Marseille - France, 2011.

Medina-Oliva G., Weber P., Levrat E., Iung B., (2009b). *Probabilistic Relational Model (PRM)_based Technical Knowledge Formalization for Dependability of an Industrial System*. In : 7th Workshop on Advanced Control and Diagnosis ACD'2009, Vielona Gora, Pologne.

Medina-Oliva G., Weber P., Simon C., Iung B., (2009a). *Bayesian Networks Applications on Dependability, Risk Analysis and Maintenance*. In : 2nd IFAC Workshop on Dependable Control

Medina-Oliva, G., Weber, P., Levrat, E., & Iung, B. (2010). *Use of Probabilistic Relational Model (PRM) for Dependability Analysis of Complex Systems*. Paper presented at the 12th LSS IFAC symposium Large Scale Systems: theory and applications, Villeneuve d'Ascq, France.

Mendenhall W, Beaver RJ, Beaver BM. (2008). *Introduction to Probability and Statistics*. Brooks/Cole

Misra K. B. (2008). *Handbook of Performability Engineering*. Springer-Verlag, London, ISBN: 978-1-84800-130-5.

Mobley, R.K. (1990). *An introduction to predictive maintenance*. Van Norstrand Reinhold; N. York.

Mohaghegh Z. *On the theoretical foundations and principles of organizational safety risk analysis*. Doctor of Philosophy of the Faculty of the Graduate School of the University of Maryland. 2007.

Monchy F. (2000). *Maintenance : Méthodes et Organisations*. Edition DUNOD.

Monnin M. (2007). *Approche unifiée défaillance/dommage dans la sûreté de fonctionnement pour la régénération des matériels au combat*. Doctorat de l'Université de Valenciennes.

Monnin M. (2008). Synthèse Bibliographique. Rapport interne (Livrable N° 3). Projet DEPRADDEM : Modélisation de la Dégradation et du Processus du Pronostic pour l'Aide à la Décision de Maintenance.

Morel G, Pétrin JF, Johnson TL. (2009). *Reliability, Maintainability, and Safety*. Springer Handbook of Automation.

Mosleh A., Chang Y.H. (2004). *Model-based human reliability analysis: prospects and requirements*. Reliability Engineering & System Safety. Volume 83, Issue 2, Pages 241-253.

Muller A., Suhner M-C., Iung B. (2008). *Formalisation of a new prognosis model for supporting proactive maintenance implementation on industrial system*. Reliability Engineering and System Safety. In Press, 93(2) 234-253.

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 I.

Nakagawa T. et Mizutani S. (2009). *A summary of maintenance policies for a finite interval*. Reliability Engineering & System Safety. Volume 94, Issue 1, Pages 89-96

Nakagawa T.. (2005). *Maintenance Theory of Reliability*. Springer Series in Reliability Engineering.

Nakagawa T. (2008). *Advanced Reliability Models and Maintenance Policies*. Springer Series in Reliability Engineering.

-
- Nakagawa, T. (1979). *Imperfect preventive maintenance*. IEEE Transactions on Reliability R-28/5, 402.
- Nakagawa, T., (1984). *Optimal policy of continuous and discrete replacement with minimal repair at failure*. Naval Research Logistics Quarterly 31 (4), 543–550.
- NF EN 13306. (2001). Norme Européen. *Terminologie de maintenance*. Association Française de Normalisation (AFNOR), Paris.
- Nicholas C. (2009). *Human Error in Maintenance – A Design Perspective*. Handbook of Maintenance Management and Engineering. Springer. Part VII, 711-735.
- Noci, G. (1995). *Accounting and Non-accounting Measures of Quality-based Performances in Small Firms*. International Journal of Operations & Production Management, Vol. 15, No. 7, pp. 78-105
- Nourelfath et Ait-Kadi. (2007). *Optimization of series–parallel multi-state systems under maintenance policies*. Reliability Engineering & System Safety. Volume 92, Issue 12, Pages 1620-1626. Special Issue on ESREL 2005.
- Nourelfath M. ; Dutuit Y. (2004). *A combined approach to solve the redundancy optimization problem for multi-state systems under repair policies*. Reliability engineering & systems safety. Volume 86, Issue 3, Pages 205-213.
- Nowakowski T and Werbinka S (2009). *On Problems of Multicomponent System Maintenance Modeling*. International Journal of Automation and Computing 6(4): 364-378.
- Øien. (2001). *A framework for the establishment of organisational risk indicators*. Reliability engineering & systems safety. 74 (2) 147–167.
- Okumura S. et Okino N. (2003). *A maintenance policy selection method for a critical single-unit item in each workstation composing a FMS with CBM optimization*. Int. J. Comadem, 6: 3-9.
- Panetto H., Molina A. (2008). *Enterprise integration and interoperability in manufacturing systems: trends and issues*. Special issue on Enterprise and Interoperability Manufacturing Systems. Computer in Industry. 59/5, May, Elsevier. ISSN: 0166-3615.
- Papazoglou I.A., Bellamy L.J., Hale A.R., Aneziris O.N., Ale B.J.M., Post J.G., Oh J.I.H. (2003). *I-risk development of an integrated technical and management risk methodology for chemical installations*. Journal of Loss Prevention in the Process Industries 16 575–591.
- Parida A. (2006). *Development of a Multi-criteria Hierarchical Framework for Maintenance Performance Measurement*. Doctoral Thesis. Division of Operation and Maintenance Engineering. Luleå University of Technology.
- Pearl J. (1988). *Probabilistic reasoning in intelligent systems: networks of plausible inference*. Morgan Kaufmann Publishers Inc. San Francisco, USA.
- Pérès F., Noyes D. (2003). *Evaluation of maintenance strategy by the analysis of the rate of repair*. Revue Quality and Reliability Engineering International (QREI). Wiley InterScience Editor, V19-2, pp 129-148.

- Pérès F., Verron S., Dejean J.-P. et Averbuch D. (2007). *Formalisation d'une approche structurée de modélisation d'un système industriel complexe par Réseaux de Petri : application aux systèmes de production pétroliers offshore Ultra Grands Fonds*. Oil & Gas Science and Technology – Rev. IFP, Vol. 62, No. 3, pp. 375-389
- Pfeffer A., D. Koller, B. Milch and K.T. Takusagawa. (1999). *SPOOK: A System for Probabilistic Object-Oriented Knowledge Representation*. Proceedings of the 14th Annual Conference on Uncertainty in AI (UAI), Stockholm, Sweden.
- Pham H. and Wang H. (1996). *Imperfect maintenance*. European Journal of Operational Research Volume 94, Issue 3, Pages 425-438.
- Pierlot, S. and Dien, Y. (2007). *From organizational factors to an organizational diagnosis of the safety*. European Safety and Reliability Conference (Eds T. Aven and J. E. Vinnem), Vol. 2, pp. 1329–1335 (Taylor and Francis Group, Abingdon).
- Pintelon, Liliane et Muchiri, Peter. (2009). *Safety and Maintenance*. Handbook of Maintenance Management and Engineering. Springer Verlag London Limited.
- Pollino, C. A., et al. (2007) *Parameterisation and evaluation of a Bayesian network for use in an ecological risk assessment*. Environ. Modeling and Software. Volume 22, Issue 8, Pages 1140-1152.
- Projet SKOOB. (2011). Référence ANR PROJET 07 TLOG 021 (<http://skoob.lip6.fr>)
- Raouf A. (2004). *Maintenance Quality and Environmental Performance Improvement: An Integrated Approach*. Handbook of maintenance management and engineering. Springer-Verlag.
- Reason, J. (1997). *Managing the Risks of Organizational Accidents*. Ashgate, Aldershot, UK.
- Rechtin, (2006). March issue of INSIGHT (publication of INCOSE).
- Rigdon, S. E. & Basu, A. P. (2000). *Statistical Methods for the Reliability of Repairable Systems*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Røed, W., Mosleh, A., Vinnem, J. E., Aven, T. (2008). *On the Use of Hybrid Causal Logic Method in Offshore Risk Analysis*. Reliability Engineering and System Safety, 94 (2), 445–455.
- Roques P. (2009). *SysML par l'exemple*. Eyrolles.
- Ross D.T. *Applications and extensions of SADT*. (1985). Computer, 18(4):25-34.
- Sandborn P. et Myers J. (2008) *Designing Engineering Systems for Sustainability*. Handbook of Performability Engineering, 81-103. Springer.
- Sargent, R. G. (1998). *Verification and Validation of Simulation Models*. Proc. of 1998 Winter Simulation Conf., pp. 121–130.
- Schönbeck M., Rausand M., Rouvroye J. (2010). *Human and organisational factors in the operational phase of safety instrumented systems: a new approach*. Safety Science. Volume 48, 310-318.

-
- Sharma, R.K., Kumar D., et Kumar P.. (2005). *FLM to select suitable maintenance strategy in process industries using MISO model*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, vol.11, no.4, pp.359-374.
- Sheu, S., Griffith, W.S., Nakagawa, T. (1995). *Extended optimal replacement model with random minimal repair costs*. European Journal of Operational Research 85, 636–649.
- Sowa, J. F.; Zachman, J. A. (1992). *Extending and formalizing the framework for information systems architecture*. IBM Systems Journal. Volume: 31 Issue: 3. Pages: 590 – 616.
- Swain A.D. et Guttmann H.E. (1983). *Handbook on Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications*. NUREG/CR1278, USNRC.
- Swanson, L. (2001). *Linking maintenance strategies to performance*. International Journal of Production Economics, Vol. 70 No. 3, pp. 237-44.
- Takata, S., Kimura F., van Houten F.J.A.M., Westkämper E., Shpitalni M., Ceglarek D. and Lee. J. (2005). *Maintenance: changing role in life cycle management*. Annals of the CIRP, 53 (2), pp. 643–655.
- Tango, T., (1978). *Extended block replacement policy with used items*. Journal of Applied Probability 15, 560–572.
- 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.
- Torti, L., & Wuillemin, P.-H. (2009). *Modélisation de réseaux bayésiens de très grandes tailles*. Manifestation de JEunes Chercheurs STIC.
- Torti, L., & Wuillemin, P.-H. (2010). *Structured Value Elimination with D-Separation Analysis*. Florida Artificial Intelligence Research Society Conference.
- Trucco P., Cagno E., Ruggeri F., Grande O. (2008). *A Bayesian Belief Network modelling of organisational factors en risk analysis: A case study in maritime transportation*. Reliability Engineering and System Safety. Volume 93, Issue 6, Pages 845-856.
- UN World Commission on Environment and Development. (1987). *Our Common Future*. Oxford: Oxford University Press.
- Valdez-Flores, C., Feldman, R.M. (1989). *A survey of preventive maintenance models for stochastically deteriorating single-unit systems*. Naval Research Logistics 36, 419–446.
- Van Noortwijk J.M.. (2009). *A survey of the application of gamma processes in maintenance*. Reliability Engineering and System Safety, Volume 94, Issue 1, Pages 2-21.
- Vernadat F. (1996). *Enterprise Modeling and Integration*. Chapman and Hall.
- Vernadat, F. B. (1996). *Enterprise Modeling and Integration: Principles and Applications*. Chapman & Hall, London.

- Villemeur, A. (1988). *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels*. Collection de la direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, Eyrolles, France.
- Volovoi, V.V. (2004). *Modeling of System Reliability Using Petri Nets with Aging Tokens*. Reliability Engineering and System Safety, 84(2): pp. 149–161, 2004.
- Von Bertalanffy, L. (1976). *General System Theory: Foundations, Development, Applications*. George Braziller Inc., New York.
- Waeyenbergh G. and Pintelon L., *Maintenance concept development: a case study*. Int J Prod Econ 89 (3), pp. 395–405
- Wang H. and Pham H. (1999). *Some maintenance models and availability with imperfect maintenance in production systems*. Annals of Operations Research, vol. 91, pp. 305–318.
- Wang H. *A survey of maintenance policies of deteriorating systems*. (2002). Eur J Oper Res 139 (3), pp. 469–489.
- Wang L., Chu J., Wu J. (2007). Selection of optimum maintenance strategies based on a fuzzy analytic hierarchy process, International of production economics 107 151–163.
- Wang, H., Pham, H. (2006). *Reliability and Optimal Maintenance*. Springer Series in Reliability Engineering; Springer-Verlag: London.
- Weber P. (2002). Dynamic Bayesian Networks model to estimate process availability. In 8th International Conference Quality, Reliability, Maintenance, CCF'02. Sinaia, Romania.
- Weber P., Jouffe L. (2003). *Reliability modeling with Dynamic Bayesian Networks*. Reliability Engineering and System Safety. Volume 91, Issue 2, Pages 149-162.
- Weber P., Jouffe L. (2006). *Complex system reliability modeling with Dynamic Object Oriented Bayesian Networks (DOOBN)*. Reliability Engineering and System Safety. Volume 91, Issue 2, 149-162.
- Weber P., Suhner M.-C., Iung B. (2001). *System approach-based Bayesian Network to aid maintenance of manufacturing process*. 6th IFAC Symposium on Cost Oriented Automation, Low Cost Automation. Berlin, Germany, 33-39, October 8-9.
- Weber P., Ttheilliol D., Aubrun C. (2008). *Component Reliability in Fault Diagnosis Decision-Making based on Dynamic Bayesian Networks*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part O Journal of Risk and Reliability 222, 2 161-172.
- Weber P., **Medina-Oliva G.**, Simon C., Iung B. (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.
- Zequeira R. et Bérenguer C. (2005). On the inspection policy of a two-component parallel system with failure interaction. Reliability Engineering & System Safety. Volume 88, Issue 1, Pages 99-107.

Zhao J., Chan A.H.C., Roberts C., Madelin K.B. (2007) Reliability evaluation and optimisation of imperfect inspections for a component with multi-defects. *Reliability Engineering and System Safety* 92 (2007) 65–73.

Zille V. (2009). Modélisation et évaluation des stratégies de maintenance complexes sur des systèmes multi-composants. Doctorat de l'Université de Technologie de Troyes.

Zouakia R., Bouami D., Tkiouat M., (1999) Industrial systems maintenance modelling using Petri nets, *Reliability Engineering & System Safety*, Volume 65, Issue 2, Pages 119-124, ISSN 0951-8320.

Annexe 1

Procédure d'estimation des coûts au sein des nœuds d'utilité

Les coûts identifiés dans l'équation (16) sont représentés au sein du PRM à travers des nœuds d'utilité, définis comme :

Nœud Coûts Fixes

Les charges incompressibles comme le loyer, les coûts liés à la gestion de l'organisation... (Tableau 39)

CF	U _{CF}
----	-----------------

Tableau 39 . Table associée au nœud d'utilité « coûts fixes »

Nœud VA

Ce sont les bénéfices maximums dégagés par la production. Le VA est calculé en fonction du nombre des produits et de leur prix de vente (Eq. (8)).

Dans le PRM, nous intégrons un nœud « utilité 'VA' » dépendant du nœud CR Fonction. Alors, ce nœud aura deux modalités : « disponible » et alors le produit est réalisé et « non-disponible » et en conséquence le produit est non-réalisé. Ces modalités sont en relation avec la disponibilité du composant (ou système). En ce sens, les coûts liés à la disponibilité du système sont évalués en utilisant l'approximation présentée par (Fougerousse et al., 1992), (Crespo, 2008) et (Dhillon, 1999). Nous considérons que la production est proportionnelle à la disponibilité de la fonction principale du système. En conséquence il faut calculer le VA en fonction de la disponibilité du système comme (Marseguerra et Zio, 2000) (Weber et Suhner, 2003) (Tableau 40).

CR Fonction	Disponible	Non-disponible
U_{VA}	$U_{VA,D}$	$U_{VA,ND}$

Tableau 40. Table associée au nœud d'utilité « VA »

$U_{VA,D}$ = bénéfice dégagé par la production ($U_{VA,D}$ = Prix de Vente x Quantité de produits (objectif de production))

Le résultat sera fonction de la disponibilité du système durant une période du temps, du prix de vente et de la quantité des produits planifiés (objectif).

$U_{VA,ND}$ = zéro (puisque les produits n'ont pas été réalisés)

Nœud CP

Ce sont les coûts liés à l'énergie et aux matières premières pour la production. Les coûts sont estimés en fonction de la probabilité d'être disponible pour produire. Deux modalités sont

considérées : les coûts du produit réalisé (parce que le système est disponible) et non-réalisé (parce que le système est indisponible) (Tableau 41).

CR Fonction	Disponible	Non-disponible
U_{CP}	$U_{CP,D}$	$U_{CP,ND}$

Tableau 41. Table associée au nœud d'utilité « CP »

$U_{CP,D}$ = coût de matière + coût d'énergie (en considérant la matière pour les nombre de produits objectifs)

Dans cette première modalité les coûts de production sont considérés.

$U_{CP,ND}$ = zéro. Lorsque le système a été indisponible, il n'a pas pu produire alors ni la matière ni l'énergie ont été utilisés.

Nœud CM

De façon similaire à (Léger, 1999) nous considérons les coûts des pièces de rechanges et des matériaux consommables pour les activités de maintenance. Le CM est une variable qui intègre les coûts liés à l'énergie et aux matériaux pour la maintenance. Ces coûts sont fonction du type de maintenance réalisé. Il y a donc plusieurs modalités : la maintenance corrective minimale (CM,CP), corrective parfaite (CM,CT), systématique minimale (CM,SP), systématique parfaite (CM,ST), systématique imparfaite (CM,SI), conditionnelle minimale (CM,COP), conditionnelle parfaite (CM,COT), et conditionnelle imparfaite (CM,COI) (Tableau 42 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Type de maintenance corrigée	CM,CP (1)	CM,CM (2)	CM,SP (3)	CM,SM (4)	CM,SI (5)	CM,COP (6)	CM,COM (7)	CM,COI (8)
U_{CM}	$U_{CM,CP}$	$U_{CM,CM}$	$U_{CM,SP}$	$U_{CM,SM}$	$U_{CM,SI}$	$U_{CM,COP}$	$U_{CM,COM}$	$U_{CM,COI}$

Tableau 42. Table associée au nœud d'utilité « CM »

$U_{CM,CP}$ (1) = Coûts de consommables et pièces de rechanges des actions correctives parfaites (en considérant que toutes les actions sont correctives).

$U_{CM,CM}$ (2) = Coûts de consommables et pièces de rechanges des actions correctives minimales (en considérant que toutes les actions sont correctives).

$U_{CM,SP}$ (3) = Coûts de consommables et pièces de rechanges des actions préventives systématiques parfaites (en considérant que toutes les actions sont systématiques).

$U_{CM,SM}$ (4) = Coûts de consommables et pièces de rechanges des actions préventives systématiques minimales (en considérant que toutes les actions sont systématiques).

$U_{CM,SI}$ (5) = Coûts de consommables et pièces de rechanges des actions préventives systématiques imparfaites (en considérant que toutes les actions sont systématiques).

$U_{CM,COP}$ (6) = Coûts de consommables et pièces de rechanges des actions préventives conditionnelles parfaites (+Coût d'entretien du système d'observation (s'il existe) : coûts directs de consommables et pièces de rechanges des actions correctives/préventives du système

d'observation + Coût d'énergie) (en considérant que toutes les actions sont conditionnelles/prévisionnelles).

$U_{CM,COM}$ (7) = Coûts de consommables et pièces de rechanges des actions préventives conditionnelles minimales (+Coût d'entretien du système d'observation (s'il existe) : coûts directs de consommables et pièces de rechanges des actions correctives/préventives du système d'observation + Coût d'énergie) (en considérant que toutes les actions sont conditionnelles/prévisionnelles).

$U_{CM,COI}$ (8) = Coûts de consommables et pièces de rechanges des actions préventives conditionnelles imparfaites (+Coût d'entretien du système d'observation (s'il existe) : coûts directs de consommables et pièces de rechanges des actions correctives/préventives du système d'observation + Coût d'énergie) (en considérant que toutes les actions sont conditionnelles/prévisionnelles).

Nœud Cor

Ce nœud intègre les coûts de pénalités causés par les défaillances (Tableau 43 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Ces sont des coûts liés aux pertes de production (Dhillon, 1999).

Type de maintenance corrigée	Cor,CP (1)	Cor,CM (2)	Cor,SP (3)	Cor,SM (4)	Cor,SI (5)	Cor,COP (6)	Cor,COM (7)	Cor,COI (8)
U_{Cor}	$U_{Cor,CP}$	$U_{Cor,CT}$	$U_{Cor,SP}$	$U_{Cor,ST}$	$U_{Cor,SI}$	$U_{Cor,COP}$	$U_{Cor,COT}$	$U_{Cor,COI}$

Tableau 43. Table associée au nœud d'utilité « Cor »

$U_{Cor,CP}$ (1) = Coûts associés aux pertes occasionnées par les défaillances en supposant que des actions de maintenance correctives parfaites sont réalisées sur le système.

$U_{Cor,CM}$ (2) = Coûts associés aux pertes occasionnées par les défaillances en supposant que des actions de maintenance correctives minimales sont réalisées sur le système.

$U_{Cor,SP}$ (3) , $U_{Cor,SM}$ (4) , $U_{Cor,SI}$ (5) , $U_{Cor,COP}$ (6), $U_{Cor,COM}$ (7), $U_{Cor,COI}$ (8) = zéro. Les actions préventives sont réalisées parce que le composant n'est pas tombé en panne. De cette façon, s'il n'y a pas de défaillance, il n'y a pas de coût de pénalité associé.

Nœud CL

Les coûts de logistique stockage sont aussi pris en compte dans (Léger, 1999). Ce sont les coûts liés au stockage et au transport des pièces de rechanges pour réaliser des actions de maintenance. En ce sens, le matériel ou les outils peuvent être disponibles ou non-disponibles. Pour garantir ou augmenter la disponibilité des outils, il faut engager des coûts soit de stockage, de redondance ou d'entretien (Tableau 44).

PF Matériel à utiliser	Disponible	Non-disponible
U_{CL}	$U_{CL,D}$	$U_{CL,ND}$

Tableau 44. Table associée au nœud d'utilité « CL »

$U_{CL,D}$ = Coût de stockage pour obtenir 100% de disponibilité de pièces + coût de transport

$U_{CL,ND}$ = Coût de transport

Normalement, l'indisponibilité des pièces ou des outils produit une pénalité au niveau de la production au travers d'une augmentation du temps hors service. Toutefois, ces coûts sont déjà pris en compte indirectement en $U_{VA,ND}$ par propagation comme des coûts liés à la non-réalisation de la fonction.

Nœud CPer

Ce sont les coûts liés à la disponibilité du personnel. En ce sens, le personnel peut être disponible ou non-disponible (Tableau 45).

PF Matériel à utiliser	Disponible	Non-disponible
U_{CL}	$U_{CL,D}$	$U_{CL,ND}$

Tableau 45. Table associée au nœud d'utilité « CPer »

(Léger, 1999) estime ces coûts à travers le temps d'intervention et les coûts horaires d'un opérateur. Le fait d'avoir le personnel disponible pour réaliser des interventions (plus de temps disponible pour réaliser des interventions) implique une charge de personnel plus élevée et en conséquence des coûts de personnel plus élevés. Pour cette raison, les coûts du personnel sont aussi calculés en fonction de la disponibilité du personnel (par exemple en intégrant le prix des heures supplémentaires).

$U_{CPer,D}$ = Coût du personnel (pour obtenir 100% de disponibilité (calculé à travers le nombre de heures-hommes demandées pour remplir le plan de maintenance préventive et pour réaliser les interventions correctives (heures programmées + heures non-programmées)).

$U_{CPer,ND}$ = est égal à zéro (0), puisque normalement, l'indisponibilité du personnel produit une pénalité production par l'augmentation du temps hors service. Ces coûts sont indirect et sont pris en compte en $U_{VA,D}$ comme des coûts liés à la non-réalisation de la fonction.

Annexe 2

Procédure de calcul de la probabilité conditionnelle pour le nœud « Disponibilité initiale »

Nous proposons une méthode qui permet de calculer la disponibilité moyenne. Pour estimer la probabilité conditionnelle d'être disponible sachant qu'un type d'action avec une efficacité donnée a été réalisée, tout d'abord il faut caractériser les temps de défaillances et les temps de réparation avec des distributions de probabilité. De cette façon cette procédure tient en compte de l'indisponibilité causé par les interventions de maintenance. Puis en utilisant ces distributions il est possible de calculer la durée moyenne hors service (de l'anglais mean down time) (Knezevic, 2009) pour chaque type d'action :

$$MDT = \int_0^{+\infty} (1 - M(t))dt = \int_0^{+\infty} t \times m(t)dt$$

Une fois précisée la procédure pour obtenir l'un des paramètres nécessaires (MDT) pour calculer la probabilité d'être disponible sachant qu'une action donnée est réalisée alors il faut définir comment calculer le temps moyen de bon fonctionnement (MUT). Pour cela nous supposons que les composants sont soumis à un processus de dégradation continue et croissant dans le temps. Le MUT est calculé en fonction de l'impact de l'intervention sur la restauration du composant. Ci-dessous, nous proposons une procédure pour calculer le MUT selon le type d'action (MUT_X sachant que $X = \text{type_d_action_avec_efficacité_i}$) en s'appuyant sur les processus stochastiques.

1. **MUT corrective minimal** : Le temps de bon fonctionnement (MUT_{MINCOR}) pour les défaillances qui sont corrigées avec de la maintenance minimale (dépannage) est calculé en utilisant le *processus non-homogène de Poisson* pour une distribution de Weibull (c'est l'une des distributions la plus utilisée pour modéliser le vieillissement d'un composant) :

$$MUT_{MINCOR} = \int_0^{\infty} e^{-\left[\left(\frac{t-1}{\alpha}\right)^{\beta} - \left(\frac{t_1}{\alpha}\right)^{\beta}\right]} dt$$

L'indisponibilité est calculée comme le quotient entre le temps moyen hors service et le temps entre défaillance MTBF.

$$1 - A_{MINCOR} = \frac{MDT_{MINCOR}}{MTBF_{MINCOR}}$$

Sachant que : $MTBF_{MINCOR} = MUT_{MINCOR} + MDT_{MINCOR}$

Où :

A_{MINCOR} : Disponibilité obtenue suite à des actions correctives minimales.

MUT_{MINCOR} : Temps de bon fonctionnement suite à des actions correctives minimales.

MDT_{MINCOR} : Temps hors service suite à des actions correctives minimales.

$MTBF_{MINCOR}$: Temps moyen entre défaillances suite à des actions correctives minimales.

Nous considérons qu'une action corrective minimale produit un temps de mise hors service lié à la remise en état du composant.

2. MUT corrective parfait

Pour le calcul du MUT, il est pertinent d'utiliser un *processus de renouvellement* pour calculer les MUT (indépendance entre le temps de défaillance). De cette façon, le MUT est estimé par :

$$MUT_{PARCOR} = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

$$1 - A_{PARCOR} = \frac{MDT_{PARCOR}}{MTBF_{PARCOR}}$$

Où :

A_{PARCOR} : Disponibilité obtenue suite à des actions correctives parfaites.

MUT_{PARCOR} : Temps de bon fonctionnement suite à des actions correctives parfaites.

MDT_{PARCOR} : Temps hors service suite à des actions correctives parfaites.

$MTBF_{PARCOR}$: Temps moyen entre défaillances suite à des actions correctives parfaites.

Dans ce cas, nous considérons qu'une action corrective parfaite produit un temps de mise hors service lié au remplacement du composant lors de sa défaillance.

3. **MUT préventive minimal** : Généralement ce type de maintenance comprend des inspections. Il faut prendre en compte ce type d'action car elles demandent d'arrêter l'équipement pour l'inspecter : dans ce cas les inspections affectent donc la disponibilité. La procédure de calcul de l'indisponibilité est définie comme :

$$1 - A_{MINSYS} = \frac{\frac{MUT_{MINSYS}}{T_{MINSYS}} \times MDT_{MINSYS} + MDT_{PARCOR}}{MTBF_{MINSYS}}$$

Où :

A_{MINSYS} : Disponibilité obtenue suite à des actions systématiques minimales.

$MUT_{PARSYST}$: Temps de bon fonctionnement suite à des actions systématiques minimales.

$MDT_{PARSYST}$: Temps hors service suite à des actions systématiques minimales.

$MTBF_{PARSYST}$: Temps moyen entre défaillances suite à des actions systématiques minimales.

4. MUT systématique parfait

Ce type de maintenance remplace le composant de façon préventive alors il est pertinent d'utiliser un *processus de renouvellement* pour calculer les MUT.

Il faut considérer les actions systématiques qui s'adressent à l'élimination d'un ensemble de modes de défaillances. Normalement ces actions doivent éliminer l'apparition des défaillances mais il existe toujours un risque d'apparition dépendant de l'intervalle (T_p) avant lequel est effectuée l'action. Alors pour le calcul du MUT systématique est considéré la probabilité d'arriver à l'instant T_p ou la probabilité de ne pas y arriver (Crespo, 2008). Le MUT est défini comme :

$$MUT_{PARSYST} = R(T_p) \times T_p + \int_0^{T_p} R(t) dt \times F(T_p)$$

Le $MUT_{PARSYST}$ est calculé en tenant en compte des scénarios possibles :

1. fonctionner jusqu'à l'instant T_p ou,
2. être défaillant entre l'instant zéro et T_p . Pour cela la valeur attendue d'un cycle pour l'apparition d'une défaillance est tronquée à T_p ($\int_0^{T_p} R(t) dt$).

Dans ce cas, le $MDT_{PARSYST}$ est calculé comme le barycentre entre ces deux alternatives :

1. Si le composant fonctionne jusqu'à l'instant T_p , alors une action de maintenance préventive est réalisée donc le temps en état hors service sera : $MDT_{PARSYST}$.
2. Mais si le composant tombe en panne avant l'instant T_p , alors une action de maintenance corrective est réalisée donc le temps en état hors service sera : MDT_{PARCOR} .

Cela permet de calculer l'indisponibilité du composant :

$$1 - A_{PARSYST} = \frac{R(T_p) \times MDT_{PARSYST} + (1 - R(T_p)) MDT_{PARCOR}}{\left[R(T_p) \times T_p + \int_0^{T_p} R(t) \times F(T_p) \right] + \left[R(T_p) \times MDT_{PARSYST} + (1 - R(T_p)) MDT_{PARCOR} \right]}$$

Où :

$A_{PARSYST}$: Disponibilité obtenue suite à des actions systématiques parfaites.

$MUT_{PARSYST}$: Temps de bon fonctionnement suite à des actions systématiques parfaites.

$MDT_{PARSYST}$: Temps hors service suite à des actions systématiques parfaites.

$MTBF_{PARSYST}$: Temps moyen entre défaillances suite à des actions systématiques parfaites.

5. MUT systématique imparfait

Ce type de maintenance est surtout préventif (i.e. changement de l'huile, graissage...), où l'état du composant est amélioré mais pas comme neuf.

Comme le MUT « imparfait » est borné par les deux cas extrêmes nous faisons l'hypothèse que la proportion de réduction de l'âge est équivalent à un effet de restauration parfaite (p) et son complément (q) est équivalent à un effet de restauration minimale (q) (Wang et Pham, 1996). En conséquence cet effet d'amélioration du MUT est réalisé par une probabilité « p » que le MUT_{IMPAR} soit aussi bon que le MUT_{PAR} et une probabilité « q » ($q=1-p$) de que le MUT_{IMPAR} soit aussi mauvais que le MUT_{MIN} :

$$MUT_{IMPAR} = p \times MUT_{PAR} + (1-p) \times MUT_{MIN}$$

Cette proposition sur les effets restaurateurs des actions, reste une approximation, puisque dans la réalité le degré de restauration de l'action peut changer à chaque intervention. Par exemple, le degré de restauration peut changer en fonction de la qualité des pièces de rechanges (Clavareau et Labeau, 2009) (Crespo, 2008). Toutefois l'utilisation d'une moyenne est une hypothèse cohérente par rapport à la disponibilité des informations dans l'industrie.

L'impact des actions imparfaites sur l'indisponibilité est obtenu par :

$$1 - A_{IMPARSYS} = \frac{\frac{MUT_{IMPARSYS}}{T_{IMPARSYS}} \times MDT_{IMPARSYS} + MDT_{PARCOR}}{MTBF_{IMPARSYS}}$$

Où :

$A_{IMPARSYS}$: Disponibilité obtenue suite à des actions systématiques imparfaites.

$MUT_{IMPARSYS}$: Temps de bon fonctionnement suite à des actions systématiques imparfaites.

$MDT_{IMPARSYS}$: Temps hors service suite à des actions systématiques imparfaites.

$MTBF_{IMPARSYS}$: Temps moyen entre défaillances suite à des actions systématiques imparfaites.

Dans ce cas nous considérons que l'indisponibilité est issue du nombre de fois que la maintenance imparfaite est réalisée pendant la durée en bon fonctionnement du composant

et lorsque le composant tombe en panne, il faut prendre en compte également l'impact de l'action corrective.

(Wang et Pham, 1996) suggèrent une méthode de calcul du facteur de rajeunissement « p » à travers l'historique des temps entre défaillances en faisant l'hypothèse que le temps entre défaillances diminue au cours du temps (Figure 88).

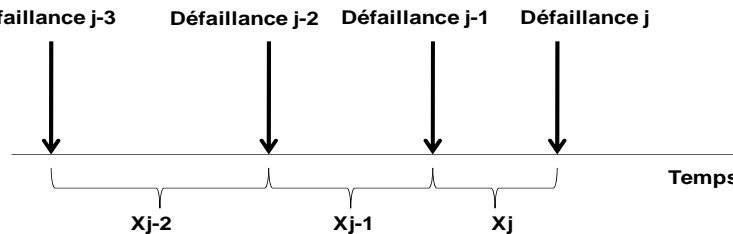


Figure 88. Diminution de temps entre défaillances au cours du temps

Pour le calcul de ce facteur, pour chaque intervalle de temps, les auteurs proposent :

$$p = p_j / p_{j-1}$$

Où,

p_j est le temps passé depuis l'avant-dernière défaillance jusqu'à la dernière défaillance

$p = p_{j-1}$ est le temps passé de la défaillance précédente jusqu'à l'avant-dernière défaillance.

Pour calculer un facteur global, nous estimons donc « p » comme :

$$P(\text{rajeunissement}) \approx \hat{p} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n \hat{p}_{Raj\ i}$$

Pour le cas où il n'y a pas de retour de données important, nous proposons de créer une typologie générique des actions de maintenance en précisant leur « p » et leur « q » dans des domaines industriels similaires. Sur le (FD X 60-000, 2002) nous trouvons certaines actions génériques :

- graissages, lubrification,
- nettoyage,
- remplacement de filtres,
- réglages simples (alignement de poulies, alignement pompe-moteur, etc.),
- contrôle et réglages impliquant l'utilisation d'appareils de mesure externe aux biens.

6. MUT conditionnel parfait

En théorie la maintenance conditionnelle élimine les défaillances grâce à la supervision des variables représentatives de la dégradation.

Alors, nous faisons l'hypothèse que le MUT sera égal au temps de mission du composant. Nous considérons que les risques d'apparition de défaillance sont associés au système d'observation (déjà compris dans le modèle PRM) (en considérant que le seuil est bien défini).

L'indisponibilité associée sera surtout liée au temps d'intervention préventive mais à la différence de la systématique, la maintenance conditionnelle intègre le temps d'intervention variable en fonction du niveau de dégradation du composant. Pour cette raison, nous proposons de simuler la dégradation du composant en s'appuyant sur un processus comme le processus Gamma (Noortwijk, 2007), (Grall et al., 2002), entre autres, et de simuler donc les périodes d'intervention T . Avec les résultats d'intervention, il faudra ensuite calculer une « Périodicité d'intervention moyenne ». De façon similaire au calcul du MUT (détermination de distribution de probabilité et calcul de l'intégral en fonction de la distribution de temps d'intervention), l'espérance du temps T_{COND} d'intervention conditionnelle est obtenue par :

$$E(T_{COND}) = \int_0^{+\infty} t \times f(t) dt$$

Où :

$f(t)$ = distribution du temps pour la variable intervention de maintenance conditionnelle

Puis :

$$1 - A_{PARCOND} = \frac{MUT_{PARCOND} \times MDT_{PARCOND}}{T_{COND} \times MTBF_{PARCOND}}$$

Où :

$A_{PARCOND}$: Disponibilité obtenue suite à des actions conditionnelles parfaites.

$MUT_{PARCOND}$: Temps de bon fonctionnement suite à des actions conditionnelles parfaites.

$MDT_{PARCOND}$: Temps hors service suite à des actions conditionnelles parfaites.

$MTBF_{PARCOND}$: Temps moyen entre défaillances suite à des actions conditionnelles parfaites.

L'indisponibilité est issue du nombre de fois que la maintenance conditionnelle est réalisée pendant la durée en bon fonctionnement du composant.

7. MUT conditionnel imparfait

Ce type de maintenance améliore l'état du composant sans le remettre à l'état neuf, ce qui implique qu'au cours du temps et des actions imparfaites réalisées, l'état du composant continue à se dégrader de façon de plus en plus importante. Ainsi des actions imparfaites sont réalisées jusqu'à atteindre le seuil de remplacement conditionnel.

L'impact des actions imparfaites conditionnelles sur l'indisponibilité est obtenu par :

$$\bar{A}_{IMPARCOND} = \frac{\frac{MUT_{IMPARCOND}}{T_{IMPARCOND}} \times MDT_{IMPARCOND} + MDT_{PARCOND}}{MTBF_{IMPARCOND}}$$

Où :

$A_{IMPARCOND}$: Disponibilité obtenue suite à des actions conditionnelles imparfaites.

$MUT_{IMPARCOND}$: Temps de bon fonctionnement suite à une action conditionnelle imparfaite.

$MDT_{IMPARCOND}$: Temps hors service suite à une action systématique imparfaite.

$MTBF_{IMPARCOND}$: Temps moyen entre défaillances suite à une action systématique imparfaite.

8. MUT conditionnel minimal

Dans ce cas, la procédure de calcul est similaire à celle du « conditionnel imparfait ».

$$\bar{A}_{MINCOND} = \frac{\frac{MUT_{MINCOND}}{T_{COND}} \times MDT_{MINCOND} + MDT_{PARCOND}}{MTBF_{MINCOND}}$$

Où :

$A_{MINCOND}$: Disponibilité obtenue suite à des actions conditionnelles minimales.

$MUT_{MINCOND}$: Temps de bon fonctionnement suite à des actions conditionnelles minimales.

$MDT_{MINCOND}$: Temps hors service suite à des actions conditionnelles minimales.

$MTBF_{MINCOND}$: Temps moyen entre défaillances suite à des actions conditionnelles minimales.