



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. Ecole Supérieure des Sciences et Technologies de l'Ingénieur de Nancy
Ecole Doctorale IAEM Lorraine
Département de Formation Doctorale Automatique

Thèse

présentée pour l'obtention du titre de

Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy I

Spécialité Automatique, Traitement du Signal et Génie informatique

par **Alexandre MULLER**

Contribution à la maintenance prévisionnelle des systèmes de production par la formalisation d'un processus de pronostic

Thèse soutenue publiquement le 7 juin 2005 devant la Commission d'examen composée de :

Rapporteurs	Daniel NOYES	Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tarbes
	Christophe BERENGUER	Professeur à l'Université de Technologie de Troyes
Examineurs	Adolfo CRESPO MARQUEZ	Associate Professor at the University of Seville
	Didier MAQUIN	Professeur à l'Institut National Polytechnique de Lorraine
	Marie-Christine SUHNER	Maître de Conférences à l'Université Henri Poincaré Nancy I
	Benoît IUNG	Professeur à l'Université Henri Poincaré Nancy I (Directeur de thèse)
Invité industriel	Jean-Baptiste LEGER	Directeur de la société PREDICT
		Docteur de l'Université Henri Poincaré Nancy I

A LA MEMOIRE DE MES GRANDS PARENTS,
A MES PARENTS ET A TOUTE MA FAMILLE,
AU BONATE ET A TOUTE LA FINE EQUIPE,
AUX LOCATAIRES DE LA CLINIQUE LAFARGUE DEBUT AOUT,
AUX EX, ACTUELS ET FUTURS JOUEURS DE L'USEB,
A FLORIMONDE.

Remerciements

Toutes les personnes m'ayant permis de mener à bien ce travail sont assurées de ma gratitude.

Je tiens d'abord à remercier mes encadrants, Benoît IUNG et Marie-Christine SUHNER, pour la confiance qu'ils m'ont accordée, leur soutien constant, leurs précieux conseils et leur disponibilité tout au long de cette recherche.

Mes remerciements s'adressent ensuite aux membres du jury qui me font l'honneur de participer à la soutenance. Je remercie sincèrement Daniel NOYES et Christophe BERENGUER pour avoir accepté d'évaluer mes travaux en qualité de rapporteurs. Mes remerciements s'adressent également à Adolpho CRESPO MARQUEZ, Didier MAQUIN et Jean-Baptiste LEGER pour leur participation au jury en tant qu'examineurs.

Je tiens également à témoigner ma reconnaissance à Philippe WEBER, Eric LEVRAT, Gérard MOREL ainsi qu'à l'ensemble des membres du CRAN, de l'ESSTIN, de la société PREDICT et de l'AIP-PRIMECA pour leur collaboration à ce travail de recherche. Ces remerciements s'adressent naturellement à tous les doctorants que j'ai rencontrés depuis mon DEA et qui m'ont apporté leur amitié et leur sympathie.

Je ne saurais terminer sans une pensée pour ma famille et pour mes proches sans qui je n'aurais jamais pu arriver jusque-là. Un grand merci à mes parents pour leur soutien et leur compréhension. Merci également à l'ensemble de mes amis de m'avoir toujours encouragé, réconforté, et... supporté malgré mes sautes d'humeur. Enfin, je remercie tout particulièrement celle qui a toujours cru en moi et qui m'a apporté durant ces quelques années son aide et son réconfort.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	3
I. VERS UNE MAINTENANCE PREVISIONNELLE DES SYSTEMES DE PRODUCTION	9
1. Introduction.....	9
2. Vers la performance globale de l'entreprise	9
2.1. La recherche d'une triple performance	9
2.2. De l'importance du maintien en conditions opérationnelles du système de production	11
2.3. Synthèse.....	17
3. La mutation du processus de maintenance	18
3.1. Vers une maintenance plus coopérative.....	18
3.2. Vers une maintenance plus proactive	27
3.3. Vers un système intégré de maintenance prévisionnelle.....	30
3.4. Synthèse.....	32
4. Conclusion.....	32
II. LE PROCESSUS DE PRONOSTIC : PROCESSUS CLE D'UN SYSTEME INTEGRE DE MAINTENANCE PREVISIONNELLE	37
1. Introduction.....	37
2. Description des processus fondamentaux du SIMP	39
2.1. Le processus de surveillance.....	39
2.2. Le processus de pronostic	41
2.3. Le processus d'aide à la décision.....	43
3. Le pronostic : talon d'Achille de la maintenance prévisionnelle.....	45
3.1. Intégration du processus de pronostic dans le SIMP	45
3.2. Formalisation du processus de pronostic	46
4. Conclusion.....	65
III. PROPOSITION D'UNE METHODOLOGIE DE MODELISATION DU PROCESSUS DE PRONOSTIC	69
1. Introduction.....	69
2. Principe de la combinaison d'approches	70
3. Principe de modélisation du processus de pronostic	71
3.1. Description du pronostic.....	71
3.2. Phases de la méthodologie	73
4. Formalisation des connaissances nécessaires à l'élaboration du modèle probabiliste	74
4.1. Modélisation du fonctionnement du système de production.....	76
4.2. Modélisation de la dynamique du système de production	88
5. Elaboration du modèle probabiliste par combinaison des modèles Fonctionnel et Dynamique	92
5.1. Choix du formalisme de représentation	92
5.2. Théorie des réseaux bayésiens et des réseaux bayésiens dynamiques	95

5.3. Mécanismes génériques de construction du modèle comportemental.....	98
6. Elaboration du modèle événementiel.....	104
7. Construction du modèle de pronostic par couplage des modèles probabiliste et événementiel.....	106
8. Mise en œuvre du processus de pronostic par couplage des modèles événementiel et probabiliste	109
8.1. Support du modèle de pronostic.....	110
8.2. Réalisation du pronostic.....	110
8.3. Procédure de mise à jour du modèle de pronostic.....	113
9. Conclusion.....	114
 IV. CONSTRUCTION ET MISE EN ŒUVRE DU PROCESSUS DE PRONOSTIC SUR LA PLATE-FORME TELMA	 117
1. Introduction	117
2. Présentation de la plate-forme TELMA.....	118
2.1. Description du procédé physique	118
2.2. Description de l'architecture de commande.....	119
2.3. Description de l'architecture de maintenance	120
2.4. Application proposée	121
3. Formalisation des connaissances nécessaires à l'élaboration du modèle probabiliste.....	122
3.1. Modélisation du fonctionnement du système de Déroulage / Pressage.....	122
3.2. Modélisation dynamique du système de Déroulage / Pressage.....	130
4. Élaboration du modèle probabiliste.....	133
4.1. Identification des variables du RBD	133
4.2. Elaboration de la structure	134
4.3. Définition des états des variables statiques	135
4.4. Détermination des paramètres.....	137
5. Construction du modèle événementiel.....	139
5.1. Modèle événementiel de la dégradation.....	139
5.2. Modèle événementiel de la maintenance	140
6. Construction du modèle de pronostic	142
6.1. Intégration des indicateurs de dégradation.....	142
6.2. Intégration des interventions de maintenance	144
7. Mise en œuvre du processus de pronostic du système de Déroulage / Pressage sur la plate-forme TELMA..	145
7.1. Architecture opérationnelle du système intégré de maintenance prévisionnelle de TELMA	145
7.2. Implantation du processus de pronostic	146
7.3. Réalisation du pronostic.....	149
7.4. Mise à jour et validation des paramètres du modèle de pronostic.....	152
8. Conclusion.....	153
 CONCLUSION ET PERSPECTIVES	 157
BIBLIOGRAPHIE.....	163
NOTATIONS	179

Introduction générale

Introduction générale

Au besoin essentiel de produire mieux et moins cher s'est adossé aujourd'hui un contexte législatif en perpétuelle évolution qui conduit les entreprises industrielles à faire face non seulement à des enjeux économiques liés aux impératifs de gains de productivité mais aussi à des enjeux sociaux liés aux impératifs de sécurité des hommes et des matériels, aux exigences de protection de l'environnement et de réduction des nuisances [Ducq *et al.*, 2003].

Ces enjeux vitaux pour la survie, voire la prospérité de l'entreprise, se déclinent concrètement au niveau du système complexe d'exécution de la production par le concept de Maintien en Conditions Opérationnelles (MCO) devant garantir, tout au long de la phase d'exploitation, la finalité attendue du système par une maîtrise holistique de ses performances. Dans ce but, le maintien en conditions opérationnelles met en oeuvre un ensemble de moyens logistiques et de processus dont le processus pivot de maintenance considéré actuellement comme l'un des principaux leviers d'action sur la performance globale des systèmes de production [Sénéchal, 2004] (impact simultané sur la productivité, la disponibilité de l'outil de production, la qualité du produit mais aussi sur les aspects sécuritaires, la gestion de l'environnement...).

Cette performance est d'autant plus difficile à maîtriser que l'évolution continue de l'environnement, les reconfigurations fréquentes de l'outil de production, le vieillissement des composants... modifient sans cesse les caractéristiques du système de production à maintenir en opérationnalité.

La prise en compte de cette dynamique requiert au minimum de surveiller le système et son environnement afin de réagir en cas d'apparition de dégradations du processus opérant ou de dérives qualités du produit, voire d'anticiper ces aléas pour éviter d'en subir les conséquences. Ces sous-processus majeurs de surveillance de déviation et d'anticipation des dégradations induisent au niveau du processus de maintenance l'émergence de nouvelles approches proactives comme la maintenance prévisionnelle. Cette émergence conduit au déploiement industriel, grandement facilité par les Nouvelles Technologies de l'Information et de Communication (NTIC), d'architectures innovantes du système de maintenance sous une forme coopérative & distribuée (concept de e-maintenance) plus à même de supporter ces sous-processus au plus près des éléments à maîtriser du système de production.

Cependant, le développement d'un système de maintenance prévisionnelle réellement efficient par rapport aux objectifs d'un maintien en conditions opérationnelles requiert à ce jour de compléter les fondements scientifiques de la maintenance prévisionnelle initiée dans les travaux de [Léger, 1999] au travers de trois axes complémentaires : la formalisation des processus fondamentaux de maintenance prévisionnelle, leur intégration dans un système de maintenance cohérent et la définition de l'ensemble du procédé de modélisation. En effet, cette discipline manque encore cruellement de concepts, de méthodes, d'outils... *"We simply do not know how to measure the performance degradation of components and machines, we lack the validated predictive models and tools that tell us what would happen when the process parameters decrease from values"*

[Lee, 1998]. Ces problématiques font actuellement l'objet à la fois de contrats industriels¹ conséquents, de projets européens d'envergure (PROTEUS, DYNAMITE) et de recherches au niveau national (MACOD), européen (ESReDA, IMS-Noe) et international (IMS, IFAC).

Ce constat scientifique est d'autant plus vrai pour le processus de pronostic considéré comme le processus clé de la maintenance prévisionnelle par sa notion d'anticipation [Wang P. *et al.*, 1999], et paradoxalement, identifié à cause de sa relative jeunesse, comme le moins avancé en terme de formalisation et d'intégration. *"Le pronostic de l'évolution de la dégradation est aujourd'hui une science très difficile qui reste encore un domaine très balbutiant."* [ZwingeZstein, 1995].

En ce sens, notre contribution porte sur la formalisation d'un processus de pronostic adapté au déploiement d'une stratégie de maintenance de type prévisionnel sur un système manufacturier de production. La démarche de modélisation proposée s'appuie sur le couplage d'une représentation probabiliste de l'état d'un système (basée sur le formalisme des Réseaux Bayésiens (RB) [Jensen, 2001]) à une approche événementielle de surveillance de la dégradation.

La formalisation du processus de pronostic bénéficie ainsi simultanément de la connaissance *a priori* du comportement du système de production (pronostic basé sur l'expérience) et du suivi on-line de son évolution réelle (pronostic guidé par les données).

L'étude du système de production dans ses différentes configurations (normale, marche dégradée, HS...), la définition de mécanismes de construction applicables aussi bien au niveau du composant qu'au niveau du procédé et l'identification de l'influence de la dégradation des composants sur les performances du système constituent trois des éléments légitimant l'originalité de notre approche.

Cette contribution est développée dans ce mémoire en quatre chapitres.

- Le rôle et l'apport du processus de maintenance au sein de l'entreprise sont décrits puis évalués dans le premier chapitre. Cette évaluation met en évidence un certain nombre de verrous scientifiques comme l'intégration de la maintenance dans l'entreprise, le déploiement d'approches de maintenance coopératives et distribuées... Parmi ces verrous, le développement d'une stratégie de maintenance prévisionnelle à partir, entre autres, d'une formalisation et d'une intégration du processus de pronostic, est une problématique majeure justifiée à la fois d'un point de vue industriel et d'un point de vue scientifique.
- Ce constat nous amène, dans le deuxième chapitre, à définir le rôle du processus de pronostic au sein d'un système de maintenance prévisionnelle puis à positionner les contributions scientifiques et industrielles relatives à sa formalisation dans le cadre de référence de [Lhoste, 1994] suivant la classification d'approches proposée par [Byington *et al.*, 2002] :
 - pronostic basé sur un modèle physique,
 - pronostic guidé par les données,
 - pronostic basé sur l'expérience.
- A partir de ces trois approches, nous proposons dans le troisième chapitre, notre propre méthodologie de modélisation du processus de pronostic qui combine les trois types de démarches énoncées précédemment, de manière à profiter simultanément des avantages et

¹ Contrats en e-maintenance passés par le GT MACOD avec la DCN et GIAT industries.

d'éliminer les inconvénients des approches prises séparément [Luo *et al.*, 2003]. Cette méthodologie est basée sur quatre étapes essentielles :

- formalisation des connaissances,
 - élaboration d'un modèle probabiliste,
 - élaboration d'un modèle événementiel,
 - construction d'un modèle unique de pronostic par couplage des modèles probabiliste et événementiel.
- Enfin, le dernier chapitre est consacré à une application de la démarche proposée sur une plateforme d'expérimentation proche d'une réalité industrielle actuelle en matière de technologies, de complexité ou d'intégration matérielle et logicielle... L'objectif de l'expérimentation est, dans un premier temps, de démontrer la faisabilité de la méthodologie proposée en développant le processus de pronostic sur un système complexe réel (multi-composants, multi-états soumis à des interactions multiples). Dans un second temps, une évaluation de l'apport du processus de pronostic est proposée.



Chapitre I

Vers une maintenance prévisionnelle des systèmes de production



I. Vers une maintenance prévisionnelle des systèmes de production

1. Introduction

La problématique de nos travaux est induite par l'émergence du concept de "durabilité", qui oblige dorénavant les industriels à intégrer dans leur stratégie de développement, au-delà de la finalité économique habituelle, de nouvelles préoccupations sociales et environnementales.

Dans ce contexte, les industriels cherchent, dans un premier temps, à maîtriser leurs performances de manière holistique et, dans un second temps, à trouver des leviers d'action permettant d'améliorer la performance globale de leur entreprise.

Cible privilégiée, le processus de production répond à ces nouvelles exigences par l'intermédiaire du processus de Maintien en Conditions Opérationnelles du système de production (MCO).

Cependant, le processus de MCO doit évoluer vers des aspects plus coopératifs et plus proactifs s'il veut garantir l'obtention d'une performance globale satisfaisante tout au long de la phase d'exploitation du système de production.

Cette nécessité se décline concrètement sur l'ensemble des sous-processus du MCO et, plus particulièrement, sur le processus clé de Maintenance.

Dans ce contexte, le premier chapitre positionne l'apport théorique d'une stratégie de maintenance prévisionnelle face à ces objectifs et d'identifier les problématiques soulevées par le déploiement effectif d'un Système Intégré de Maintenance Prévisionnelle (SIMP).

2. Vers la performance globale de l'entreprise

2.1. La recherche d'une triple performance

La présence de l'expression du développement durable (ou de durabilité) dans les discussions tant scientifiques que politiques ou commerciales est quasi-incontournable depuis deux décennies. Même si l'effet de mode est incontestable, la question du développement durable est le reflet d'une véritable interrogation de l'opinion publique au sujet de l'avenir de la planète [Gélinier *et al.*, 2002].

En effet, les limites du modèle de développement capitaliste industriel sont apparues clairement au travers des atteintes à l'environnement causées par l'activité économique (pollutions, effet de serre, désertification...), et de l'accroissement des inégalités sociales-économiques entre pays riches et pays pauvres, population riche et population pauvre au sein d'un même pays, d'une même région ou d'une même ville.

La commission Brundtland a défini en 1987 le développement durable de la manière suivante : c'est "un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs" [WCED, 1987]. Derrière cette expression se cache donc un concept humaniste [Jollivet, 2001], qui assigne aux pouvoirs publics et aux industriels notamment, outre leur responsabilité classique de création de valeur sur le plan économique, la responsabilité explicite de deux valeurs jugées vitales par la communauté :

- la préservation écologique de la planète,
- le respect de la dignité humaine.

Volontaires ou contraints par des pressions réglementaires² et sociétales, les industriels s'orientent donc vers la prise en compte des principes du développement durable qui se révèle être, au vu des premières expériences menées, un gage de compétitivité, de valorisation et de pérennité pour l'entreprise [Sofres, 2003].

La mise en pratique du développement durable dans l'industrie se traduit concrètement par la recherche d'une triple performance (économique, environnementale et sociale) où la finalité économique de l'entreprise demeure, reste essentielle, mais s'y ajoutent de nouvelles exigences sur les plans humain/social et environnemental [Gélinier *et al.*, 2002] (concept de *Triple Bottom Line*³). Comme il n'est pas question de faire varier le niveau de l'un des critères sans analyser l'effet que cela peut avoir sur les autres, l'entreprise doit concevoir sa performance de manière globale (Figure 1).

Cette vision globale se décline sur l'ensemble des processus de l'entreprise dont la contribution individuelle n'a de sens que si elle permet d'atteindre le niveau requis pour la performance globale⁴, sachant que la somme des performances locales est différente de la performance globale [Ducq *et al.*, 2003].

² Les pouvoirs publics (français et européens) ont récemment mis en place des textes de loi qui incitent fortement les entreprises à intégrer la notion de développement durable dans leur stratégie [UE, 2001].

³ Selon ce concept, l'entreprise doit avoir trois lignes directrices : économique / environnementale / sociale, et rechercher une triple performance au bénéfice des 3 P que sont People (les gens) Planet (la terre) Profit (l'argent).

⁴ Le concept de "performance globale" du système de production est synonyme d'obtention conjointe de la pertinence (adéquation des moyens mis en œuvre par rapport aux objectifs), de l'efficience (adéquation des résultats obtenus par rapport aux moyens), et de l'efficacité (adéquation des résultats par rapport aux objectifs), sur l'intégralité du cycle de vie du système [Sénéchal, 2004].

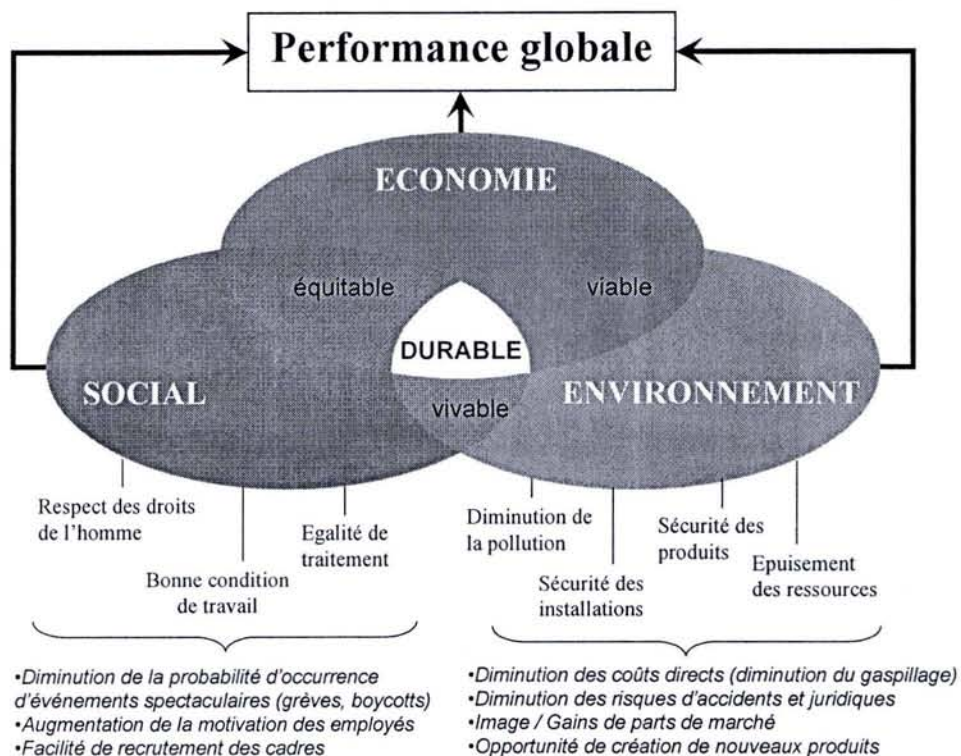


Figure 1 - La performance globale de l'entreprise d'après [Reynaud, 2003]

2.2. De l'importance du maintien en conditions opérationnelles du système de production

La problématique industrielle actuelle consiste ainsi à trouver des leviers d'action sur la performance globale de l'entreprise. Il s'agit, dans un premier temps, d'évaluer l'impact de chaque processus sur cette performance afin de pouvoir lancer, dans un deuxième temps, des actions stratégiques sur les processus au potentiel d'amélioration le plus important.

Placé au cœur de l'entreprise, le processus de production revêt un caractère critique et stratégique indiscutable [Tahon, 2003] puisqu'il génère une part importante de la valeur ajoutée de l'entreprise. Par conséquent, les industriels ont pour objectif majeur de mieux "maîtriser" ce processus dont l'impact sur la performance globale est *a priori* le plus significatif.

2.2.1. Une remise en cause du pilotage du système de production

Le rôle du processus de production sur la mise en pratique des principes de durabilité s'exprime clairement sur chacun des trois axes fondamentaux (§I.2.1) :

- sur le plan économique d'abord, car il est responsable de la maîtrise des paramètres de "profitabilité" (productivité, qualité...) ;
- sur le plan social ensuite car la majorité du personnel lui est affecté ;
- et, enfin, sur le plan environnemental car le système de production est consommateur d'énergies, de matières premières, et producteur de déchets et autres polluants.

Adaptable	les ilots sont capables de s'auto-organiser et de s'adapter à des variations inconnues de leur environnement.
Interopérable	les ilots peuvent coopérer en utilisant les services d'autres ilots pour atteindre leurs objectifs.
Visible	les ilots sont capables de s'informer mutuellement en produisant des données compréhensibles pour leur environnement.
Rigide	les ilots sont coordonnés par des liens rigides.
Ilots fragmentés	les ilots sont cloisonnés et opèrent de façon indépendante.

Figure 2 - Métrique EICM [Hollock *et al.*, 1997]

Au-delà de son rôle de pilier de la durabilité, le processus de production est également responsable de la capacité de réaction de l'entreprise aux besoins du marché. Si l'amélioration de la productivité demeure son objectif incontournable, la prise en compte des besoins du consommateur en tant qu'élément de la valeur ajoutée arrive à présent au devant de toutes les autres préoccupations [Vieille, 2000]. Au fil du développement de la concurrence et de la course à la compétitivité, la diversification des produits augmente alors que leur durée de vie diminue. L'outil de production est donc reconfiguré sans cesse pour s'adapter aux évolutions constantes de l'entreprise, de l'environnement et du marché.

Pour répondre à ces exigences, les systèmes de production ont évolué ces dernières années d'architectures hiérarchiques vers des architectures intégrées [Neureuther, 1998] leur permettant d'atteindre le niveau "visible" de la métrique EICM (Enterprise Integration Capability Model) introduite par [Hollock *et al.*, 1997] (Figure 2). Aujourd'hui, les industriels cherchent même à atteindre le niveau "interopérable" voire "adaptable" de la métrique EICM [Gouyon, 2004], niveau dans lequel les systèmes de production sont capables de s'auto-organiser et de s'adapter à des modifications de leur environnement ou de leur contexte. De cette manière, le processus de production améliore sa flexibilité (adaptation à la fabrication de nouveaux produits), sa robustesse (maintien des performances même si les conditions de fonctionnement varient) et sa réactivité (réponse rapide en cas d'occurrence d'un aléa de production).

Cependant, cette évolution conjuguée à l'arrivée de technologies plus performantes (TIC : Technologies de l'Information et de la Communication, systèmes mécatroniques⁵...) et à la virtualisation de l'entreprise [Martinez *et al.*, 2001] rend aussi les systèmes de production de plus en plus complexes (distribués, multi-sites). Pour parvenir à maîtriser les performances de ces systèmes, il faut être capable de concilier la plupart du temps des objectifs antagonistes voire contradictoires (Productivité vs Sûreté), tout en réussissant à faire collaborer un groupe d'acteurs d'origines différentes (qualité, maintenance, production...) qui ont à satisfaire leurs propres objectifs en accord avec la recherche de performance globale.

⁵ Le terme mécatronique désigne la coopération intime de la mécanique, de l'hydraulique, de l'électronique et du logiciel dans un système [Schoenig, 2004].

2.2.2. Le processus de maintien en conditions opérationnelles, support de la performance globale

Dans ce contexte de complexification de l'outil de production, relever le double challenge "Mise en pratique des principes du développement durable / Amélioration de la flexibilité et de la réactivité de l'entreprise vis-à-vis de l'évolution du produit" nécessite que chacun des sous-processus de production apporte sa propre contribution à l'obtention de la performance globale.

En ce sens, le processus de Maintien en Conditions Opérationnelles met en oeuvre⁶ un ensemble d'activités et de moyens logistiques (ravitaillement, acquisition et gestion des rechanges, opérations de maintenance, outillages, documentation, formation...) dans l'objectif de garantir tout au long de la phase d'exploitation la finalité (produit ou service) attendue du système.

Remarque : le terme MCO est issu du domaine militaire où la maîtrise à chaque instant de la disponibilité et de la sécurité des systèmes d'armes est capitale. Il est également utilisé depuis quelque temps dans le monde de la téléphonie ou des systèmes d'informations en tant que processus permettant de garantir la continuité de service du réseau et la résolution la plus rapide possible des incidents de fonctionnement.

2.2.2.1. L'impact du processus de maintien en conditions opérationnelles du système de production sur la performance globale

L'impact du MCO est visible sur les trois axes de durabilité :

- augmentation de la disponibilité et réduction des coûts directs du système de production (économie),
- maîtrise de la sûreté de fonctionnement du système de production et réduction du risque d'occurrence d'accidents néfastes pour l'environnement (environnement),
- maîtrise de la sécurité et amélioration des conditions de travail du personnel (social).

À ce sujet, [Cova *et al.*, 2001] constatent que la mauvaise gestion du MCO des bâtiments de guerre français dégrade les conditions de travail et le moral du personnel impliqué : *"Au delà de son aspect technique, l'entretien de la flotte a également des incidences très concrètes sur les conditions de travail, voire même les conditions de vie des équipages. Un bon état des équipements détermine la sécurité, la qualité et l'ambiance du service accompli par les personnels."*

Par ailleurs, [Cuignet, 2002] montre ainsi au travers d'un exemple fictif, que la perte de fiabilité d'un équipement causée par une dégradation du MCO engendre une baisse de l'indice de satisfaction clients, des retombées néfastes sur l'image de l'entreprise, des stocks supplémentaires, des problèmes de trésorerie, d'heures supplémentaires...

⁶ Selon la définition proposée par l'Association Française d'Ingénierie Système (AFIS) - <http://www.afis.fr>.

2.2.2.2. *Le pilotage du maintien en conditions opérationnelles*

Afin de trouver à tout moment un juste compromis entre les différents enjeux et les différents acteurs de la performance globale, le pilotage du MCO doit respecter trois principes fondamentaux :

- **Une vision globale de la performance [Sénéchal, 2004]**

La "globalisation"⁷ des différentes performances est difficile à réaliser en pratique à cause du caractère contradictoire de certaines d'entre elles. Par exemple, le déclenchement d'interventions préventives "sécuritaires" pénalise la disponibilité du système de production et *a contrario*, la suppression d'interventions dans une logique de diminution des coûts ou de productivité maximale, augmente le risque d'occurrence d'événements catastrophiques [Cowing *et al.*, 2004].

- **Une collaboration⁸ efficace entre les acteurs [Iung *et al.*, 1999]**

Le MCO du système de production est assuré par une multitude d'acteurs dont les niveaux d'intérêt sont plus ou moins forts pour le système et dont les critères d'appréciation de la performance du système sont différents [David, 2004]. Pour agir efficacement sur la performance globale, il est nécessaire de résoudre les inévitables conflits d'objectifs entre acteurs [Yu *et al.*, 2003].

- **Un pilotage proactif [Lee *et al.*, 2002]**

Jusqu'à une époque récente, le système de production pouvait être considéré comme figé ou évoluant faiblement dans le temps. Mais aujourd'hui, il doit être considéré selon un point de vue dynamique lui permettant de s'adapter aux évolutions constantes de l'entreprise et de l'environnement. Pour éviter de subir les conséquences d'une modification du produit ou d'un accident, la meilleure solution consiste à mettre en œuvre une démarche proactive de pilotage du processus de production et du MCO.

2.2.3. **Un acteur essentiel du maintien en conditions opérationnelles : le processus de maintenance**

Pour mettre en œuvre ces trois principes, le MCO s'appuie sur le processus pivot de maintenance considéré actuellement comme l'un des principaux leviers d'action sur la performance globale des systèmes de production [Sénéchal, 2004] à cause de son impact simultané sur la productivité, la disponibilité de l'outil de production, la qualité du produit mais aussi sur les aspects sécuritaires, la gestion de l'environnement... (Figure 3).

⁷ Action de concevoir comme un ensemble.

⁸ La collaboration désigne une action de travailler avec d'autres, à une œuvre commune. Elle s'appuie sur un engagement mutuel des participants dans un effort coordonné pour résoudre ensemble le problème posé [Rose, 2004].

Thèmes	Priorités (en %)
Maîtrise de la disponibilité des matériels	60,5
Maîtrise des coûts directs	23,9
Maîtrise de la sécurité	20,8
Maîtrise de nouvelles technologies	16,2
Maîtrise des problèmes environnementaux	9,4
Maîtrise des contraintes normatives	7,9
Externalisation de la fonction maintenance	6,5

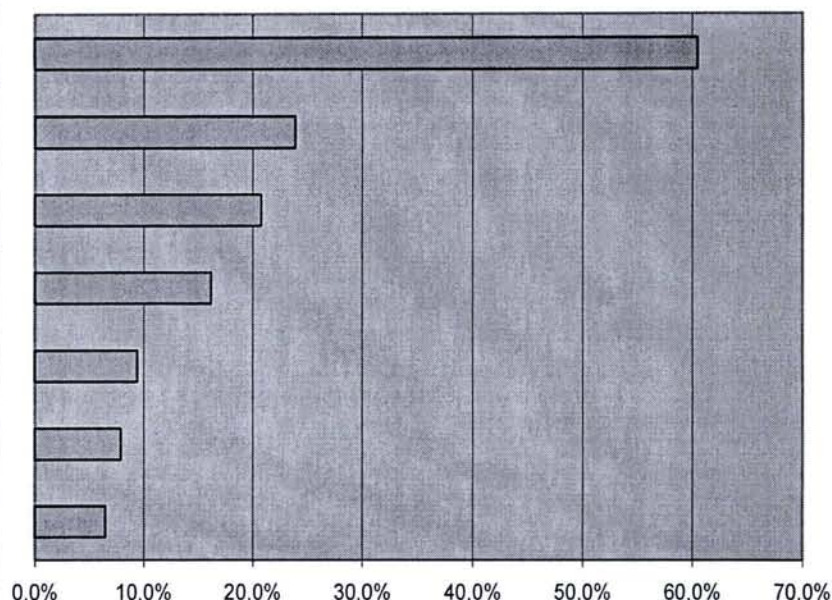


Figure 3 - Les priorités "Maintenance" à long terme des industriels [Combeau, 2002]

2.2.3.1. Une présence à chaque étape du cycle de vie du système

Le processus de maintenance est un agencement structuré de tâches techniques, administratives et de management permettant de maîtriser chaque étape du cycle de vie du système.

▪ En conception

Les coûts de maintenance s'avèrent généralement supérieurs, voire très supérieurs au coût d'acquisition initial du système de production. C'est pourquoi la maintenance est l'une des préoccupations majeures des responsables de l'entreprise tout au long de la conception du système. Dans un premier temps, il s'agit de prendre en compte les caractéristiques prévisionnelles de fiabilité, de disponibilité et de maintenabilité des composants [Hao *et al.*, 2002] afin d'effectuer des choix technologiques en adéquation avec la stratégie et les besoins réels de l'entreprise [Waeyenbergh *et al.*, 2004]. Ensuite, la réalisation d'études dysfonctionnelles prévisionnelles permet d'identifier au plus tôt les causes de toute forme d'indisponibilité et de risque vis-à-vis de la sécurité des biens, des personnes ou de l'environnement [Andrews *et al.*, 2005].

▪ En exploitation

Lors de l'exploitation du système de production, le processus de maintenance assure la gestion puis l'exécution des interventions nécessaires à son MCO (Figure 4). Schématiquement, le fonctionnement du processus repose sur le contrôle permanent des indicateurs de performance (sûreté de fonctionnement, productivité, sécurité ...) du système de production.

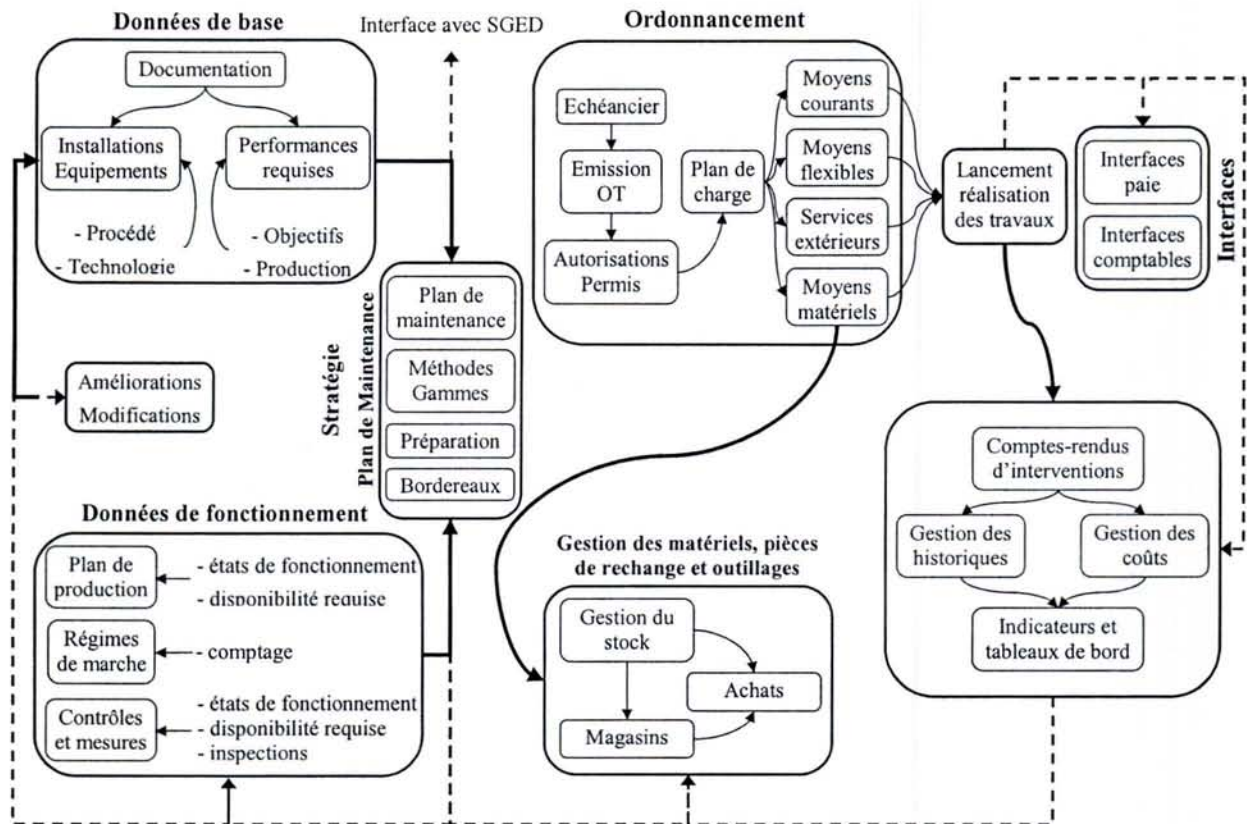


Figure 4 - Le processus de maintenance [Francastel, 1999]

Ensuite, lorsqu'un dysfonctionnement ou une dérive de performance survient, le processus de maintenance propose une liste d'opérations préventives et correctives destinées à garantir simultanément un niveau de performance acceptable pour le produit (suivant le triptyque coût / délai / qualité) et une réduction maximale des risques d'apparition d'incidents critiques.

Enfin, la planification puis l'exécution définitive des interventions résulte d'une collaboration avec le processus de production [Noyes *et al.*, 1998], [Weinstein *et al.*, 1999], [Talbi *et al.*, 2003].

▪ En fin de vie

La maintenance est responsable de l'avenir du système de production arrivé en fin de vie. En fonction de l'option retenue (démantèlement, destruction, recyclage matériel ou fonctionnel), elle doit mobiliser les ressources humaines et matérielles nécessaires pour assurer le respect des contraintes normatives en vigueur : traitement ou recyclage des composants électroniques, des matières plastiques et métalliques, des huiles moteurs...

2.2.3.2. Une évolution nécessaire

Loin d'être stabilisé, le processus de maintenance évolue toujours au gré de l'introduction de nouvelles méthodes de gestion, du développement technologique des outils de production, de la systématisation progressive de l'usage des normes et des procédures... [Combeau, 2002].

Aujourd'hui, il doit s'adapter aux contraintes de globalisation, de collaboration et de proactivité imposées par le mode de pilotage du MCO. Pour y parvenir, deux obstacles majeurs doivent être surmontés :

- **Rompre l'isolement du processus de maintenance au sein de l'entreprise**

Autrefois isolée et focalisée sur une vision locale de son action, la maintenance doit maintenant s'ouvrir aux autres processus de l'entreprise et coopérer avec eux, afin de contribuer efficacement à une amélioration de la performance globale.

En effet, le dialogue et l'échange de données entre le monde de la maintenance et les autres fonctions de l'entreprise (direction, achats, production...) restent difficiles puisque le processus de maintenance n'est, en général, pas rattaché au système d'information global de l'entreprise. Avant d'envisager une approche de pilotage globale et collaborative du MCO, il est donc indispensable de résoudre ces problèmes de communication et de coopération en intégrant la maintenance au système d'information global de l'entreprise.

- **Doter la maintenance de stratégies plus proactives**

L'arrivée des NTIC⁹ conjuguée à l'évolution technologique offre à présent la possibilité d'exploiter en continu une connaissance plus formelle et plus précise de l'état du système de production, qui permet de supprimer les interventions de maintenance inutiles.

Dans ce contexte, la mise en place et l'optimisation de stratégies systématiques n'ont plus beaucoup d'intérêt car elles engendrent des interventions superflues, que les stratégies conditionnelle (réactive) et surtout prévisionnelle¹⁰ (proactive) sauraient éviter [Djurdjanovic *et al.*, 2003].

2.3. Synthèse

Il n'est plus attendue seulement aujourd'hui d'une entreprise une performance économique ou financière mais une triple performance caractérisée par les trois piliers du développement durable : la croissance économique, le progrès social et la protection de l'environnement. L'émergence du concept de performance globale renforce la position et l'importance du processus de Maintien en Conditions Opérationnelles au cœur de l'entreprise.

Cependant, elle lui confère, ainsi qu'à l'ensemble de ses sous-processus, de nouvelles obligations :

- conserver une **vision globale** de la performance du processus de production,
- assurer une **collaboration** efficace entre les acteurs concernés,
- adopter une démarche de pilotage **proactive**.

⁹ NTIC : Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication

¹⁰ La maintenance prévisionnelle est définie par la norme X60-319 [AFNOR, 2001] comme une maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien.

Caractéristiques de la performance globale	Problèmes à résoudre pour le MCO du système de production	Problématiques du processus de maintenance
Multicritère (économie, environnement, social)	Conserver une vision globale de la performance du système de production	Intégrer le processus de maintenance au reste de l'entreprise ----- Développer des architectures adaptées à une maintenance coopérative et distribuée
Multi-acteur (concepteur, fabricant...)	Assurer une collaboration efficace entre les acteurs concernés	
Multi-période (court, moyen et long terme)	Adopter une démarche de pilotage proactive	Mettre en place des stratégies plus proactives et plus performantes

Tableau 1 - Problématiques actuelles du processus de maintenance

Ces exigences remettent en cause le mode de fonctionnement actuel du processus pivot de maintenance, trop isolé du reste de l'entreprise et souvent incapable de mettre en œuvre des stratégies anticipatives sur des outils de production de plus en plus complexes (Tableau 1).

3. La mutation du processus de maintenance

Pour répondre aux contraintes de globalisation, coopération et proactivité évoquées précédemment, les industriels ont privilégié deux tendances : le développement de la maintenance à distance (télémaintenance) [Lee, 1998] et le recours à la sous-traitance de certaines tâches [Kaffel, 2001].

Si ces évolutions ont permis d'améliorer l'efficacité de certaines activités (meilleure gestion des stocks de pièces de rechange, diagnostic des défaillances plus performant...), elles n'ont cependant pas débouché sur la remise en cause du fonctionnement du processus de maintenance au profit de nouvelles formes plus **coopératives**¹¹ et plus **proactives**¹².

3.1. Vers une maintenance plus coopérative

La mise en œuvre d'une maintenance coopérative est basée avant tout sur l'intégration de la maintenance dans le système d'information global de l'entreprise. Cette intégration facilite les

¹¹ La *maintenance coopérative* désigne une approche de maintenance collective organisée autour d'un ensemble d'acteurs partageant un but commun : garantir le MCO du système de production tout au long de sa phase d'exploitation.

¹² Une approche de *maintenance proactive* s'attache à surveiller les causes potentielles de défaillance alors qu'une approche réactive ne s'attaque qu'aux symptômes de cette défaillance.

échanges et la communication de la maintenance avec un ensemble de processus très différents comme la production, le contrôle de gestion, la recherche et le développement, les achats... "*To launch maintenance improvement programme, we need to streamline the information logistic: right information in right formats and form to right person in right time*" [Parida et al., 2004].

La phase d'intégration de la maintenance se concrétise ensuite par le déploiement, grandement facilité aujourd'hui par les possibilités offertes par les TIC [Pérès et al., 2004], de nouvelles architectures adaptées à la distribution géographique et à la sous-traitance d'une partie des tâches de maintenance.

3.1.1. L'intégration de la maintenance

Afin de permettre l'échange d'informations entre les différents processus impliqués dans la fabrication d'un produit, les systèmes de production ont évolué vers des architectures intégrées basées sur l'utilisation de l'informatique.

Cependant la maintenance a été historiquement tenue à l'écart de ces démarches de décloisonnement des fonctions de l'entreprise. Dans cette logique d'isolement, elle a bâti son propre Système d'Information (SI) pour répondre à ses propres besoins, sans se préoccuper des exigences des processus connexes.

3.1.1.1. Le système d'information global de l'entreprise

Autrefois décomposée en six niveaux selon le paradigme CIM (Computer Integrated Manufacturing) [Ranky, 1986], l'entreprise manufacturière est aujourd'hui organisée majoritairement en trois niveaux (Figure 5) :

- Au niveau le plus haut, les progiciels de gestion intégrés (PGI ou ERP : Enterprise Resource Planning) coordonnent l'activité de l'entreprise en lien avec d'autres progiciels de type APS¹³, SCM, CRM..., depuis la conception du produit jusqu'à sa commercialisation et sa livraison. L'ERP¹⁴ est une application informatique modulaire, paramétrable, intégrée et ouverte, qui vise à fédérer et à optimiser les processus de gestion de l'entreprise en proposant un référentiel unique et en s'appuyant sur des règles de gestion standards.
- Au niveau intermédiaire, le MES (Manufacturing Execution System) a pour ambition de piloter à travers le temps la fabrication des produits. Il autorise la réaction aux imprévus (alors que l'ERP prépare et planifie), gère l'assurance qualité et fournit les informations nécessaires à l'amélioration des procédés [Collas, 2002]. Il réalise donc le lien entre l'ERP et l'atelier afin de suivre, en temps réel, le déroulement de toutes les activités de production (suivi de fabrication, ordonnancement, contrôle qualité...).
- Enfin, au niveau le plus bas, les processus d'exécution assurent les transformations spatiales, temporelles et morphologiques des produits physiques requises par le procédé de fabrication.

¹³ APS : Advanced Planning and Scheduling ; SCM : Supply Chain Management ; CRM : Customer Relationship Management.

¹⁴ Définition donnée par V. Botta-Genoulaz lors du Séminaire du GT ERP, Mars 2004.

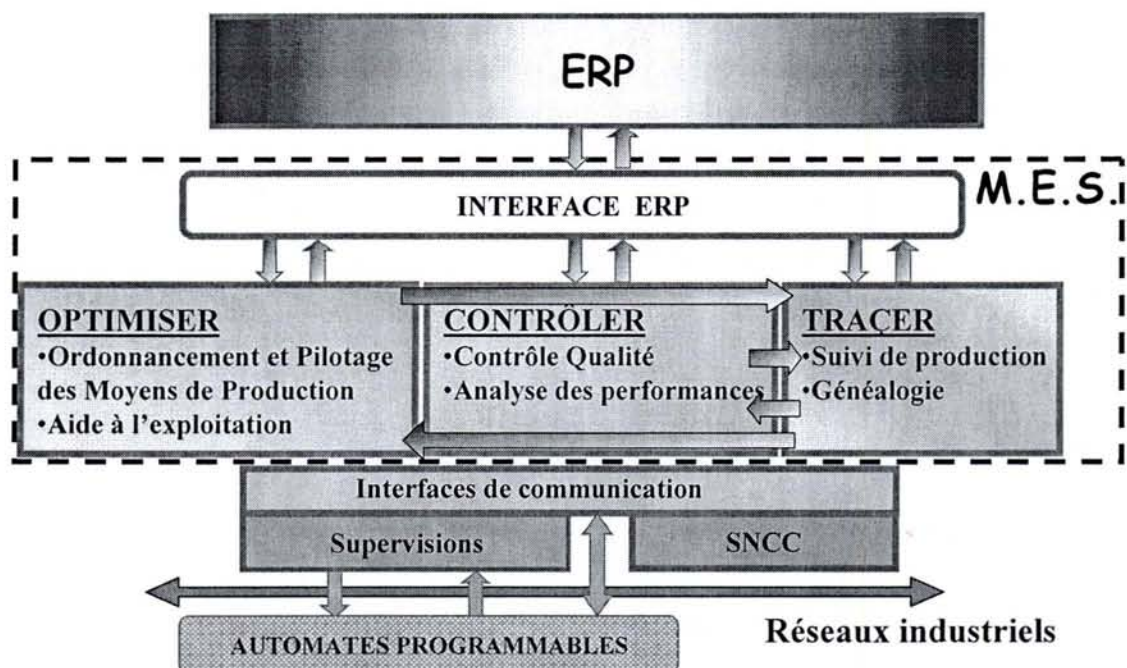


Figure 5 - Découpage du SI de l'entreprise [Matéos, 2000]

3.1.1.2. Le système d'information de maintenance

Contrairement à la production, la maintenance dispose de peu de standards¹⁵ ou de normes spécifiques destinés à formaliser les activités, les informations manipulées et les modèles utilisés par le processus de maintenance (Figure 4).

Le développement actuel d'un système d'information complet requiert par conséquent des développements spécifiques à chaque entreprise, avec une architecture et des composants hardware/software qui varient en fonction de la taille de l'entreprise, de l'organisation de son service Maintenance...

Néanmoins, le système d'information de maintenance est, en général, calqué sur celui de la production avec un couplage GMAO/MAO¹⁶ comparable au couplage ERP/MES (Figure 6).

¹⁵ On peut néanmoins citer les modèles informationnels de [Getan, 1994] ou [Smit *et al.*, 1992], essentiellement basés sur une gestion documentaire de la maintenance et sur la mise en œuvre de stratégies préventives systématiques. Les propositions récentes de MIMOSA/OSA-CBM et PROTEUS (décrites par la suite) visent à répondre à ce manque de standardisation.

¹⁶ GMAO : Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur / MAO : Maintenance Assistée par Ordinateur.

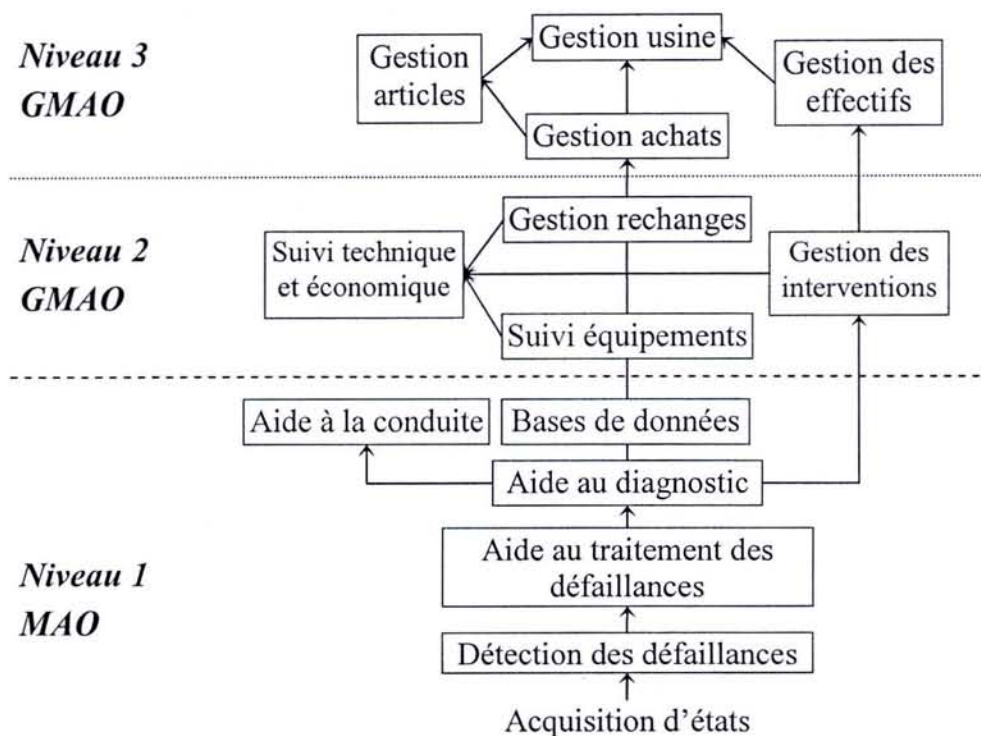


Figure 6 - Principe de structuration d'un système de MAO/GMAO [Sourisse *et al.*, 1999]

Au niveau "management" (2&3), la GMAO est chargée de la mise en œuvre de la politique de maintenance élaborée avec la direction de l'entreprise. En collaboration avec la production, elle planifie les interventions requises par le MCO du système de production puis assure la logistique de maintenance, c'est-à-dire l'ensemble des ressources, services et moyens de gestion nécessaires à l'exécution des interventions.

Au niveau "opérationnel" (1), la MAO apporte aux opérateurs une assistance à la détection et au diagnostic des défaillances, puis à l'exécution des interventions correctives et préventives. De plus, elle élabore les indicateurs de fonctionnement du procédé physique à partir de données brutes issues des composants de terrain (automates, capteurs...).

3.1.1.3. La démarche d'intégration

La gestion de la maintenance est théoriquement intégrée à la fois dans l'ERP et dans le MES¹⁷ puisque les activités qu'elle englobe se répartissent sur les deux premiers niveaux de l'entreprise. En pratique, son intégration effective n'est pas une réalité industrielle car la majorité des entreprises exploite encore l'ERP, le MES et la GMAO de manière indépendante. Les principaux problèmes posés par la démarche d'intégration résultent de la différence des sémantiques associées aux informations de maintenance, aux échelles de temps ainsi qu'aux volumes et flux d'informations échangées. Il s'avère donc indispensable d'identifier un référentiel commun qui formalise les processus mis en jeu à chacun des niveaux, les informations manipulées et les modèles utilisés [Gouyon, 2004].

¹⁷ La gestion de la maintenance est définie par le MESA (Manufacturing Enterprise Solutions Association) comme une des 11 fonctions du MES.

La norme ANSI/ISA-95¹⁸ (IEC/ISO 62264) a été développée en ce sens. Elle définit les limites de responsabilité et la teneur des informations qui doivent être échangées entre les applications de niveau ERP (3) et les applications de niveau MES (2).

À ce jour, elle comprend quatre parties :

- les deux premières définissent la nature et le contenu des flux d'information circulant entre le système de pilotage de la production (MES) et le système de gestion de l'entreprise (ERP), informations de maintenance comprises ;
- les deux suivantes formalisent de la même manière les flux d'informations échangées à l'intérieur du MES, entre ses différentes fonctions (Ordonnancement, Gestion de la Maintenance, Traçabilité, Gestion de la Qualité...).

À partir de la norme ANSI ISA-95, on peut donc définir une démarche d'intégration de la maintenance suivant deux axes (Figure 7) :

• Intégration verticale

Le rôle de la maintenance au niveau décisionnel de l'entreprise (3) consiste, d'une part, à définir le type de maintenance appliquée sur chaque équipement, et d'autre part, à assurer la gestion du personnel et la gestion des achats relatifs aux activités de maintenance.

À ce niveau, le processus de maintenance (via la GMAO) s'intègre "verticalement" avec le système de gestion de la production (ERP) en utilisant le standard d'échange défini par les parties 1 et 2 de la norme ANSI/ISA-95, ou alors en exploitant un outil de type EAI (Enterprise Application Integration) qui interface les deux systèmes en permettant à chacun d'accéder aux informations de l'autre. Le problème suivant consiste à définir une frontière fonctionnelle entre la GMAO et l'ERP, afin de fixer précisément les responsabilités de chaque système.

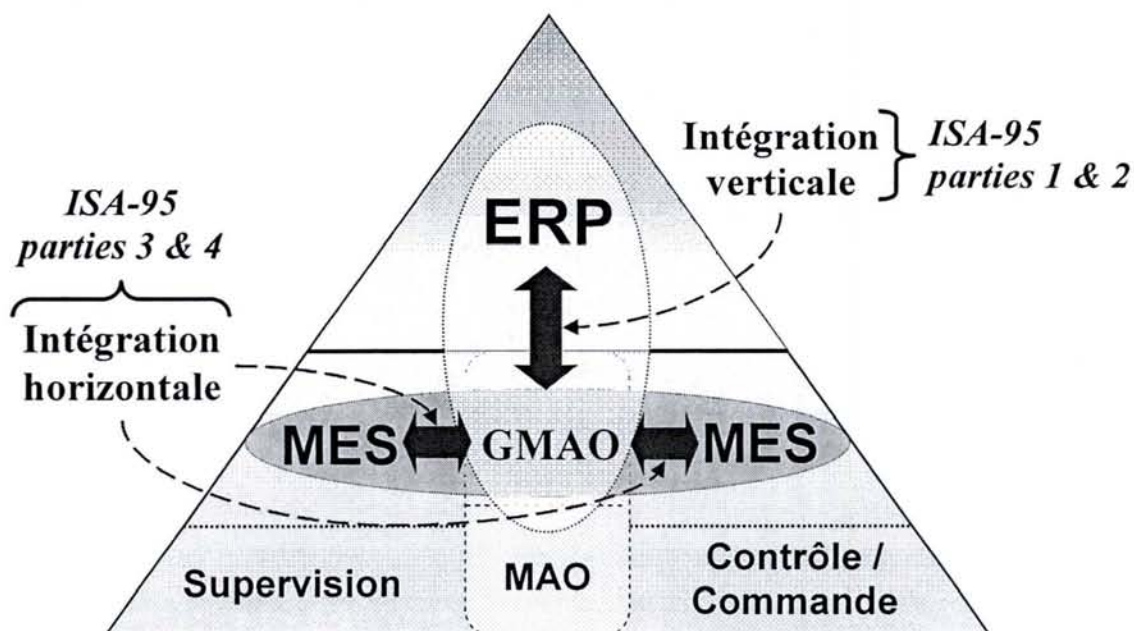


Figure 7 - Positionnement futur de la maintenance dans l'organisation de l'entreprise

¹⁸ <http://www.isa-france.org/>

Après la phase d'intégration verticale, le secteur décisionnel dispose à chaque instant d'une vision synthétique des différentes stratégies¹⁹ de maintenance envisageables permettant d'améliorer l'état courant du système de production. De cette manière, la gestion des interventions peut être délocalisée au niveau "entreprise" (ERP) ce qui permet d'orienter les recherches de performances locales, parfois contradictoires, vers la performance globale.

- **Intégration horizontale**

Le rôle de la maintenance au niveau du pilotage de la production (2) consiste à vérifier l'état de disponibilité et le niveau de dégradation des équipements afin de garantir le respect des performances attendues du système de production et du produit.

En accord avec les préconisations des parties 3 et 4 de la norme ANSI/ISA-95, l'intégration du processus de maintenance au niveau opérationnel se traduit par l'interfaçage de la GMAO avec l'ensemble des fonctions du MES et par la connexion de la MAO aux outils de surveillance / supervision, aux automatismes, aux systèmes d'acquisition... [Léger, 2004].

En ce sens, [Léger *et al.*, 2001] préconisent une intégration horizontale des fonctions de Conduite, Maintenance et Gestion technique²⁰ du système de production basée sur le concept CMMS²¹ [Iung *et al.*, 2001]. La démarche s'appuie sur la mise en œuvre d'une architecture opérationnelle distribuée (où certaines opérations de maintenance sont délocalisées dans les équipements de terrain), et sur la création d'une base de données unique incorporant l'ensemble des savoir-faire liés à chacune des activités, en assurant leur complétude fonctionnelle et informatique (Figure 8).

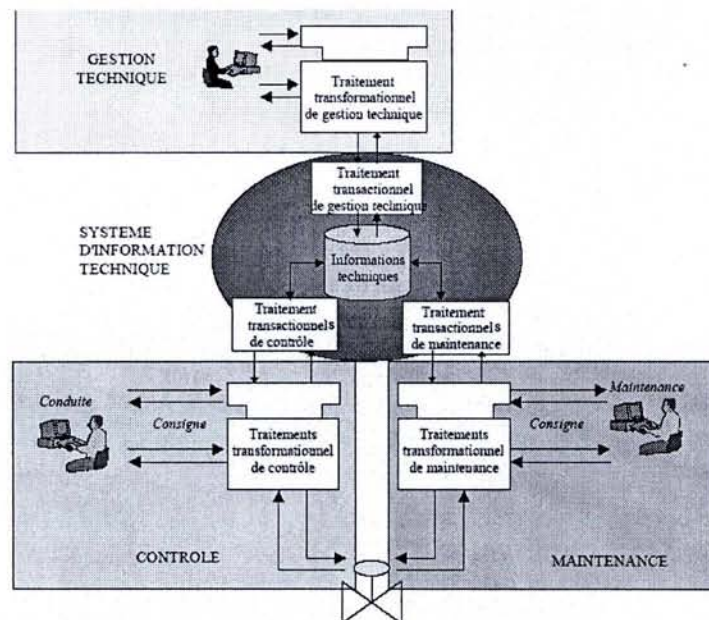


Figure 8 - Système intégré d'informations CMMS [Neunreuther, 1998]

¹⁹ La **politique de maintenance** consiste à fixer les orientations (méthode, programme, budget...), dans le cadre des buts et objectifs fixés par la direction de l'entreprise. La **stratégie de maintenance**, qui résulte de la politique de maintenance, impose des choix pour atteindre, voire dépasser les objectifs fixés. Elle implique la mise en œuvre d'un **plan de maintenance** (ensemble structuré de tâches) [AFNOR, 2002].

²⁰ La Gestion technique est une fonction d'entreprise qui a pour rôle d'assurer la communication entre les domaines de Production et de Maintenance, et celui de la gestion d'entreprise.

²¹ CMMS : Control, Maintenance and Technical Management System.

Après la phase d'intégration horizontale, le processus de maintenance concourt, au même titre que les autres processus du MES, à la problématique de fournir le bon produit, au bon moment et au bon endroit. Il dispose alors d'un système d'informations de terrain fiables (pour éviter d'avoir à juger de leur pertinence) et synthétiques (pour faciliter la prise de décision). La réactivité de la maintenance est ainsi améliorée puisque la détection de la dégradation est plus rapide et la remontée des informations nécessaires à son traitement est facilitée.

3.1.2. De nouvelles architectures de maintenance

La mise en œuvre de systèmes intégrés de maintenance dans un contexte distribué passe par le développement d'architectures opérationnelles adaptées à la délocalisation de certains traitements au plus près de l'équipement, et à la nécessité de fournir un accès distant aux informations à chaque acteur du MCO du système de production.

Plusieurs facteurs facilitent à l'heure actuelle le déploiement d'architectures de ce type parmi lesquels les technologies de l'information et de la communication (TIC) bien sûr, les nouveaux supports de communication multimédia, les nouvelles générations d'interfaces homme-machine... [Reyterou *et al.*, 2001]. Les TIC permettent désormais à l'entreprise de faire appel à des experts répartis aux quatre coins de la planète, à de multiples fournisseurs, à des entreprises du même secteur (benchmarking), à des banques de données ou de modèles... Grâce à la rapidité d'accès aux sources d'information, à leur disponibilité permanente (24h/24) et à une ouverture sur le monde entier, elles ouvrent des opportunités en termes de travail collaboratif, d'expertise en ligne ou de téléopérations [Küssel *et al.*, 2000].

Dans ce contexte, de nouvelles disciplines ont vu le jour : e-manufacturing, e-maintenance, e-logistique, e-business... (Figure 9). Elles partagent un objectif commun : réduire les inefficacités, les temps morts et les arrêts de production en faisant remonter les informations de terrain jusqu'au niveau Entreprise grâce à leur "électronisation" [Koç *et al.*, 2001].

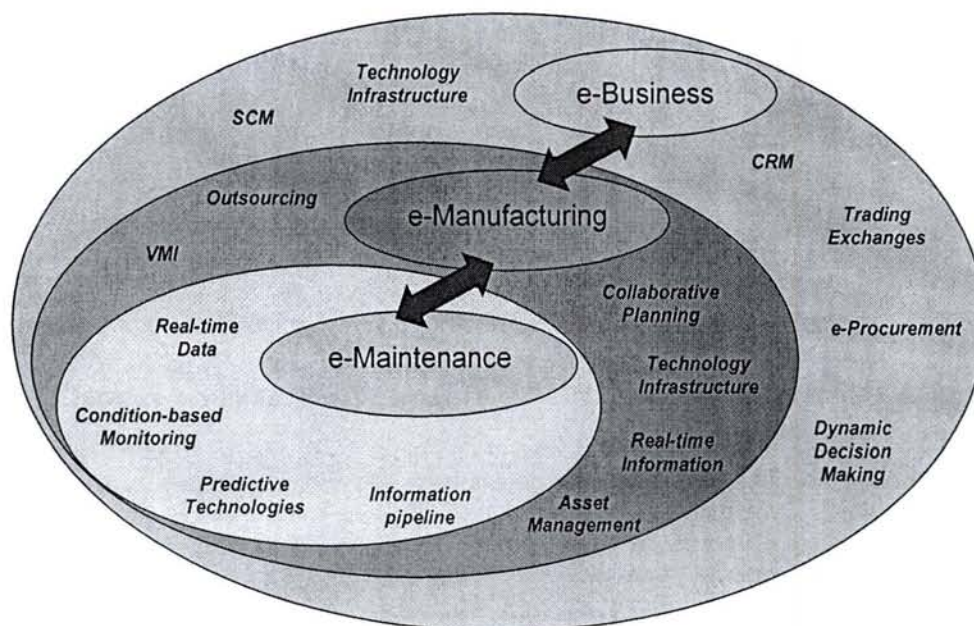


Figure 9 - Intégration de la e-maintenance au sein d'un système de e-manufacturing [Koç *et al.*, 2003]

Ceci est encore plus vrai pour la "e-maintenance", dont le principe de base consiste à intégrer l'ensemble des connaissances de maintenance (relatives à la GMAO, la MAO, la logistique de maintenance, la télémaintenance...) dans un seul système d'information afin de répondre aux besoins des différents acteurs du MCO, de la chaîne logistique et des partenaires. L'objectif à plus long terme de la "e-maintenance" est de rendre interchangeables (interopérables) les composants d'une architecture de maintenance "collaborative" et "distribuée", afin de faciliter leurs mises à jour et, par conséquent, de réduire leurs coûts. Les initiatives les plus ambitieuses dans ce domaine concernent les projets MIMOSA²² [Mitchell *et al.*, 1998] et PROTEUS²³ [Bangemann *et al.*, 2004] qui apportent aujourd'hui les premières réponses concrètes²⁴ en matière de standardisation et d'intégration des applications logicielles de maintenance.

Quelques architectures de e-maintenance

Développée par un consortium d'entreprises nord-américaines à partir du schéma relationnel MIMOSA CRIS, l'architecture fonctionnelle OSA/CBM (Open System Architecture for Condition-Based Maintenance) est une plate-forme ouverte et modulaire dédiée au développement de stratégies de maintenance conditionnelle ou prévisionnelle [Lebold *et al.*, 2001]. Elle est basée sur sept modules flexibles (Figure 10), dont le contenu (méthodologie et algorithmes) est configurable par l'utilisateur.

Cependant la présence de chaque module n'est pas indispensable, ce qui permet de créer des architectures simplifiées, adaptées à chaque besoin industriel. L'utilisation de ce standard, éventuellement couplé à d'autres normes internationales [Bengtsson, 2004], a débouché sur le développement de stratégies de maintenance prévisionnelle appliquées sur des navires de guerre, des machines lourdes de manutention, des avions, des hélicoptères...

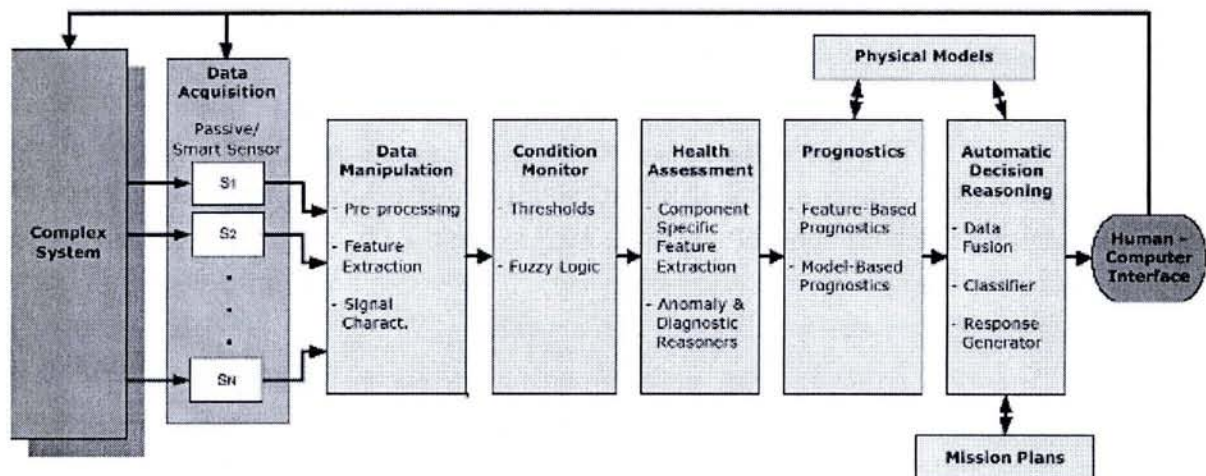


Figure 10 - Schéma conceptuel d'OSA/CBM [Lebold *et al.* 2003]

²² <http://www.mimosa.org/> Le programme MIMOSA (Machinery Information Management Open System Alliance) a été le premier à se pencher sur le développement d'un système d'information unique pour la gestion de la maintenance [Kahn, 2003].

²³ <http://www.proteus-iteaproject.com/> Le projet a comme objectif le développement d'une plate-forme générique associant, aux logiciels de GMAO, les possibilités de la télémaintenance et les avantages offerts par Internet (accès aux documentations constructeur, commande de pièces de rechange ...).

²⁴ Premiers pas vers une interopérabilité.

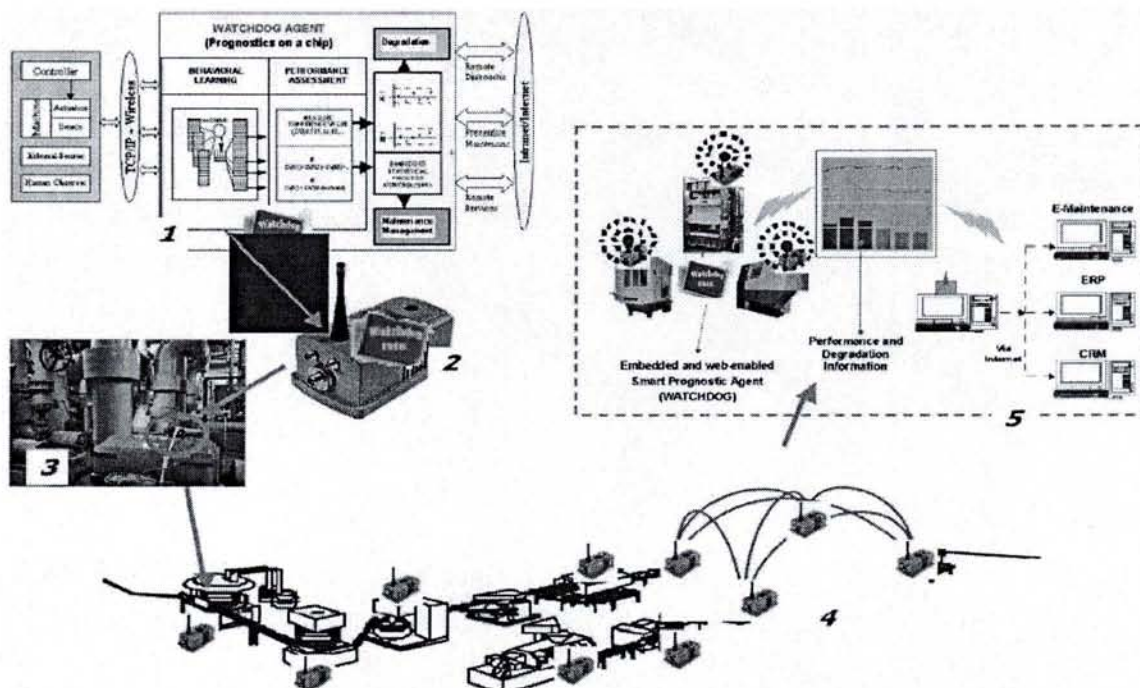


Figure 11 - Vers le E-manufacturing grâce à l'exploitation des technologies "infotronics" [Lee, 2003]

Plus proche du milieu académique, l'IMS centre²⁵ dirigé par Jay Lee développe depuis une dizaine d'années des architectures de e-manufacturing et de e-maintenance basées sur l'utilisation des technologies modernes les plus performantes (Figure 11). Le cœur de ces travaux est le "Watchdog agent", introduit par [Lee, 1998]. Installé directement sur les équipements physiques (Figure 11.1-2), ce composant "intelligent" surveille l'état courant de dégradation du composant et réalise un pronostic de son état futur. Les deux informations sont ensuite transférées via Internet/Wireless (réseau sans fil) à des collaborateurs distants qui exploitent en temps réel les données puis les enregistrent dans des bases de données (Figure 11.4-5).

De la même manière, l'architecture opérationnelle distribuée MPROS (Machinery Prognostics/Diagnostics System), utilisée dans les navires de guerre américains, dispose des boîtiers DC (Data concentrators) juste à côté des machines (Figure 12) pour recueillir les données de surveillance et assurer les traitements de diagnostic/pronostic de bas niveau [Hadden *et al.*, 2002]. Les résultats sont ensuite envoyés via un réseau sans fil du navire à une unité centrale qui effectue des traitements statistiques plus sophistiqués [Bennet *et al.*, 1999].

Par la suite, l'exploitation de moyens de communications encore plus perfectionnés : Satellite, 802.11, Bluetooth, Wireless LAN... [Hogan *et al.*, 2003], laisse entrevoir la perspective d'une transmission des informations générées par le système de maintenance local à des utilisateurs disséminés aux quatre coins de la planète (Figure 13). L'intérêt de cette ouverture est, d'une part, d'effectuer à distance des algorithmes de diagnostic/pronostic qui confirment ou infirment les résultats fournis par le système local et, d'autre part, de constituer des bases de données de retour d'expérience solides.

²⁵ <http://wumrc.engin.umich.edu/ims/>

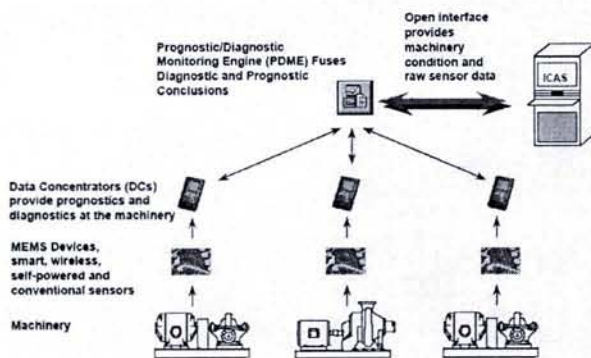


Figure 12 - Architecture fonctionnelle / organisationnelle MPROS [Hadden *et al.*, 2002]

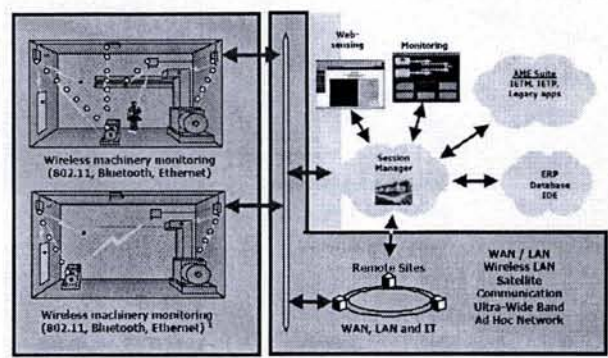


Figure 13 - Architecture TSM [Hogan *et al.*, 2003]

3.2. Vers une maintenance plus proactive

Le développement d'architectures de e-maintenance permet de réduire la distance entre les acteurs du MCO et de donner à chacun d'entre eux l'accès en temps réel aux informations de maintenance et de surveillance du système de production. La possibilité d'accéder à tout moment et en toute confiance à l'information de son choix offre de plus l'opportunité de mettre en œuvre des approches de maintenance plus collaboratives²⁶ [Iung, 2003], [Yu *et al.*, 2003] et surtout, plus proactives (anticipatives) [Lee, 2004].

En effet, face aux évolutions incessantes des caractéristiques du système de production à maintenir, causées entre autres par l'usure des composants, les modifications fréquentes du produit ou les changements de conditions climatiques, la plupart des stratégies classiques de maintenance, trop statiques, affichent leurs limites. La mise en œuvre de stratégies proactives constitue donc une alternative intéressante à explorer.

3.2.1. Les limites des stratégies traditionnelles

La recherche des conditions optimales de maintenance des équipements, fondée sur la connaissance de la fiabilité, a permis d'aller bien au-delà des gains que les politiques de maintenance préventive systématique, développées au début des années 1960, avaient permis [Combeau, 2002]. Mais aujourd'hui, les stratégies de maintenance "statiques" (correctives ou préventives) définies à partir de caractéristiques fiabilistes des équipements, engendrent encore des arrêts inutiles ou des opérations de maintenance superflues.

Pour les réduire, il convient de prendre en compte la dynamique d'évolution du système de production, c'est-à-dire de surveiller le système et son environnement afin de réagir en cas d'apparition de dégradations du processus opérant ou de dérives qualités du produit.

²⁶ En *maintenance coopérative*, le travail est découpé en sous-tâches indépendantes, chaque personne est responsable d'une partie de la résolution du problème et la coordination intervient lors de l'assemblage des résultats partiels alors que dans la *maintenance collaborative*, l'activité est synchronisée et coordonnée de manière à construire et à maintenir une vision commune du problème [Rose, 2004].

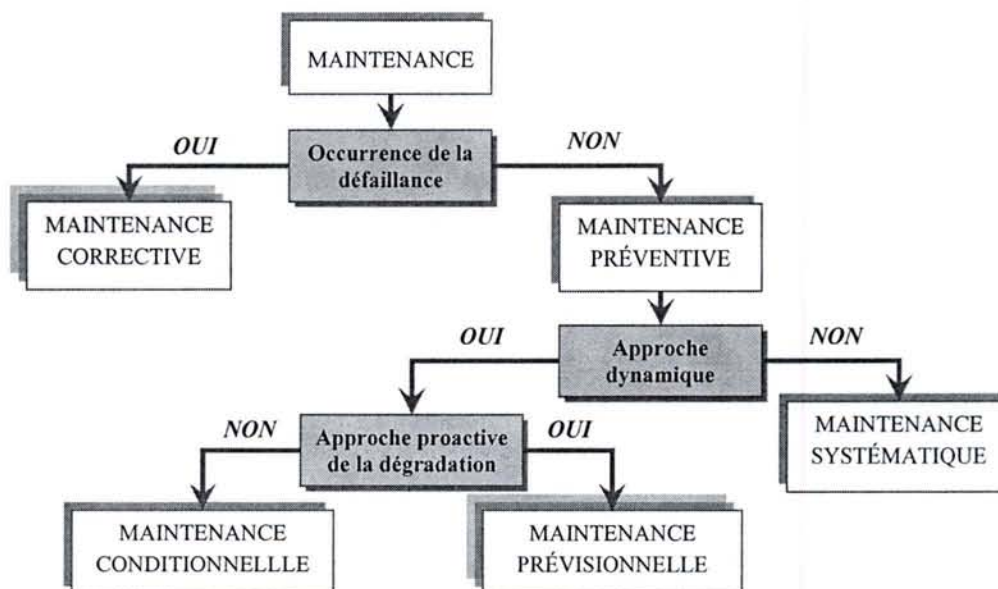


Figure 14 - Les différentes stratégies de maintenance

Ces sous-processus majeurs de surveillance de déviation et d'anticipation des dégradations induisent au niveau du processus de maintenance l'émergence d'approches réactives (conditionnelles) voire proactives (prévisionnelles) [Iung *et al.*, 2003] (Figure 14).

Comparativement à la maintenance conditionnelle, la maintenance prévisionnelle augmente la disponibilité par la réalisation d'interventions (anticipées) en temps masqué. De plus, elle diminue les dérives de qualité de service, l'insécurité et les coûts directs de maintenance grâce à un meilleur suivi des dégradations et à une meilleure maintenabilité [Léger, 1999].

Pour toutes ces raisons, la maintenance prévisionnelle se positionne *a priori* comme la stratégie la mieux adaptée aux exigences du MCO.

3.2.2. La maintenance prévisionnelle, une stratégie ambitieuse

La maintenance conditionnelle est définie par la norme X60-319 [AFNOR, 2001] comme une maintenance préventive basée sur une surveillance de la fonction du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent. D'après la même norme, la maintenance prévisionnelle (MP) est une maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien.

La MP planifie l'intervention avant l'apparition de la dégradation et donc, avant l'apparition des effets de la dégradation sur le système. De cette manière, elle n'engendre pas d'intervention préventive superflue. Désignée au départ comme le recours permettant d'éviter une défaillance catastrophique sur un élément critique, la stratégie de MP présente des bénéfices quasiment illimités au vu de l'impact potentiel de la maintenance sur les performances de l'entreprise. La liste suivante est non exhaustive :

- réduction du nombre de défaillances imprévues,
- réduction des incidents critiques,

- suppression d'actions de maintenance inutiles,
- amélioration de la planification et de la réalisation des tâches,
- diminution des temps de réparation,
- meilleurs prix des fournisseurs (achat juste à temps)...

Sur la base de ces constats industriels, [Fitch, 1996] affirme : *"Proactive Maintenance can Yield More than a 10-Fold Savings over Conventional Predictive/Preventive Maintenance Programs"*. [Morris, 1999] confirme : *"Emergency repairs cost 10 times more than planned repairs, yet reactive maintenance -- "don't fix it 'til it breaks" -- is still the mindset in many food plants. Proactive maintenance can dramatically cut costs and boost productivity."*

Cependant l'impact d'une stratégie de maintenance prévisionnelle ne concerne pas uniquement les coûts directs de la maintenance. L'exploitation des prévisions faites sur l'état futur du système de production par le MES (via les fonctions de Gestion des ressources ou d'Ordonnancement) ouvre des perspectives encore plus intéressantes pour la performance globale [Lee, 2003].

Si la maintenance prévisionnelle est prometteuse en termes de bénéfices attendus, elle est cependant la stratégie la plus difficile à mettre en œuvre. Le coût initial du développement de la maintenance prévisionnelle constitue une barrière infranchissable si le bénéfice attendu de la stratégie n'a pas été clairement identifié et quantifié au préalable. Ensuite, durant la phase de développement et d'implantation, des résultats "bénéficiaires" doivent être apportés à la direction sous peine de réduction, voire d'immobilisation des investissements [Carnero, 2004]. Enfin, le programme de maintenance prévisionnelle ne peut atteindre les résultats voulus sans la préparation du terrain et sans l'implication du personnel [Kaffel, 2001]. Il est indispensable de faire évoluer la mentalité de tous les membres de l'entreprise en leur expliquant clairement que les anciennes pratiques systématiques sont révolues, au bénéfice d'une stratégie de maintenance dynamique.

Il y a quelques années, la mise en œuvre de la maintenance prévisionnelle était une tâche extrêmement complexe à cause du manque d'instrumentation du système physique et de l'impossibilité d'observer et de diagnostiquer la quasi-totalité des dégradations.

Aujourd'hui, avec le développement et la marginalisation de technologies modernes comme l'analyse vibratoire, la thermographie, la tribologie ou les ultrasons, la situation s'est nettement améliorée et la plupart des composants critiques d'une installation industrielle peuvent être surveillés (et même pilotés) à distance (Tableau 2).

Technologie utilisée	Application
Ultrason	Corrosion, fuite hydraulique/pneumatique
Infrarouge	Echauffement de moteur, pompes, roulements...
Ferrographie	Analyse d'huile Moteur
Laser	Construction : déformation
Courant de Foucault	Fissure turbine
Chromatographie	Pollution
Acoustique	Déformation métaux, joints
Analyse spectrale	Emissions électroniques

Tableau 2 - Technologies déployées en maintenance prévisionnelle

3.3. Vers un système intégré de maintenance prévisionnelle

Nous avons mis l'accent dans le §I.3.1 sur la question de l'intégration de la maintenance au sein de l'entreprise afin de rendre ce processus plus coopératif, avant de présenter dans le §I.3.2 l'intérêt de mettre en œuvre des stratégies proactives de maintenance. Cependant, nous n'avons pas encore évoqué la possibilité de combiner ces deux orientations.

En réalité, il existe assez peu de contributions académiques ou industrielles ayant cherché à intégrer simultanément les aspects de coopération (intégration) et de proactivité au sein d'une démarche d'amélioration de la maintenance. On retrouve toutefois cette volonté dans la proposition d'un cadre formel de modélisation d'un système de maintenance prévisionnelle faite par [Léger, 1999]. Ces travaux apportent une première contribution au développement d'un Système Intégré de Maintenance Prévisionnelle (SIMP).

3.3.1. Qu'est ce qu'un système intégré de maintenance prévisionnelle ?

Par définition, le SIMP est un **système** (c'est-à-dire un ensemble de processus en interaction entre eux et avec l'environnement, intégré pour rendre à son environnement les services correspondants à sa finalité) **intégré** (coopérant avec les autres processus de l'entreprise : MCO, production...) de **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). La notion de SIMP est donc synonyme d'une double intégration : interne (intra-processus du SIMP) et externe entre les processus du SIMP et les autres processus de l'entreprise (Figure 15).

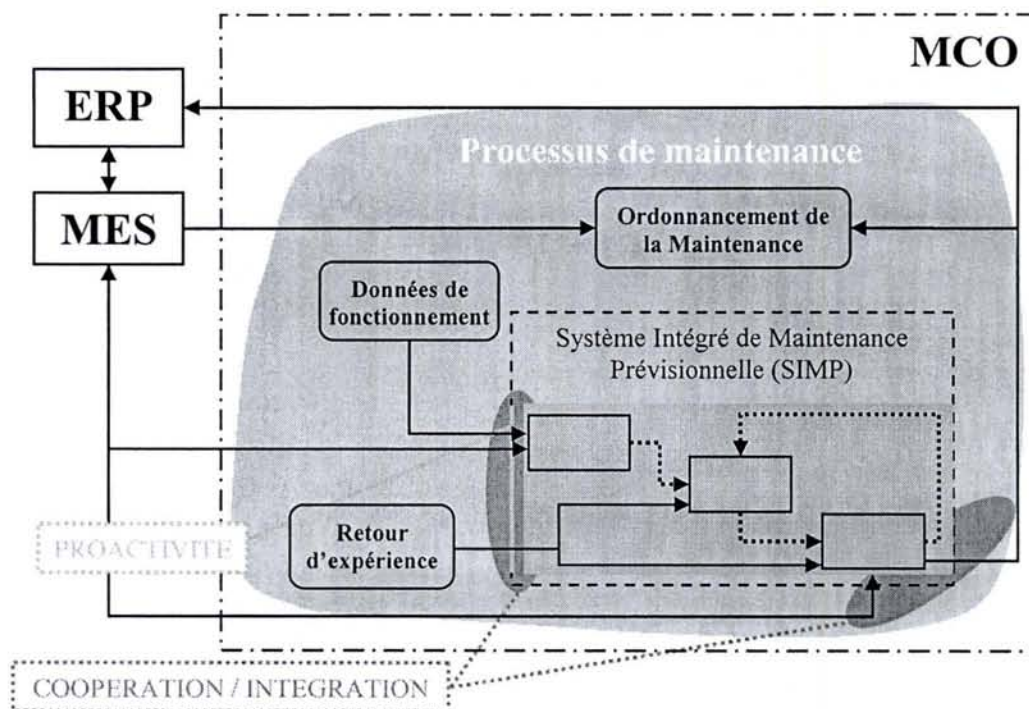


Figure 15 - Positionnement du système intégré de maintenance prévisionnelle

3.3.2. Problématiques liées au développement d'un SIMP

Le développement d'un SIMP réellement efficient par rapport aux objectifs du MCO requiert à ce jour de compléter les fondements scientifiques de cette discipline initiée dans la thèse de [Léger, 1999] au travers de trois axes complémentaires :

- la formalisation des processus fondamentaux,
- leur intégration dans un système de maintenance cohérent et
- la définition de l'ensemble du procédé de modélisation.

À ces trois questions s'ajoute aujourd'hui le besoin d'étendre la stratégie de maintenance prévisionnelle à la gestion d'un système de production entier alors qu'elle est habituellement confinée à l'optimisation de la disponibilité d'un équipement critique.

Ces nouvelles problématiques font l'objet des travaux scientifiques en cours d'une communauté nationale identifiée par l'intermédiaire du groupe de travail MACOD²⁷, dont l'objectif principal est de développer des méthodes et techniques de modélisation et d'optimisation de maintenance. Le groupe s'intéresse aux problèmes relatifs à la maintenance coopérative et distribuée, et en particulier à l'introduction des systèmes technologiques intelligents et des TIC dans la mise en œuvre de ces approches [GT MACOD, 2003].

Sur un plan international, le développement de nouvelles formes de maintenance (collaborative, distribuée, proactive) est au cœur des activités d'organisations scientifiques comme l'initiative IMS se déclinant à la fois en Intelligent Maintenance System²⁸ et en Intelligent Manufacturing Systems²⁹ (projet PROMISE - Product Embedded Information System for Service and End-Of-Life) ou l'IFAC-Technical Committee on Cost Oriented Automation³⁰, et le thème central des conférences PENTOM 2003 [Sénéchal, 2003] ou IMS 2004 [Adjallah, 2004].

Actuellement, cette communauté concentre majoritairement son attention sur la problématique d'intégration du SIMP et plus spécifiquement sur la volonté de rendre "interopérable"³¹ l'ensemble des composants hardware et software de l'architecture de maintenance prévisionnelle. Les premières réponses apportées concernent :

- la proposition d'architectures opérationnelles, de moyens technologiques et informatiques, supports du SIMP (PROTEUS [Bangemann *et al.*, 2004]),
- la définition d'un référentiel des termes communs et des objets utilisés en maintenance prévisionnelle (modèle informationnel MIMOSA CRIS [Mitchell *et al.*, 1998]),

²⁷ Site du groupe de travail MACOD (Modélisation et optimisation de la MAintenance COopérative et Distribuée) du GDR MACS (Modélisation Analyse Conduite des Systèmes dynamiques) : <http://www.univ-valenciennes.fr/GDR-MACS/macod/>

²⁸ <http://www.imscenter.net>

²⁹ http://www.ims.org/index_introduction.html

³⁰ <http://www.tu-berlin.de/~metel/ifac-lca/scope.htm>

³¹ L'interopérabilité d'un système (produit) est définie comme sa capacité à travailler et à interagir avec d'autres systèmes (produits) sans intervention spécifique de la part de son utilisateur.

- la proposition d'ajout d'une sémantique³² à ces objets à travers la création d'un modèle ontologique de maintenance prévisionnelle (MIMOSA OSA-CBM [Lebold *et al.*, 2001]).

L'objectif final est de créer, par l'intégration de ces trois composantes (architectures opérationnelles, modèle informationnel et modèle ontologique du SIMP), les conditions du déploiement industriel effectif de la maintenance prévisionnelle basée sur une interopérabilité reconnue.

3.4. Synthèse

Autrefois isolée et focalisée sur une vision locale de son action, la maintenance doit dorénavant s'ouvrir aux autres processus de l'entreprise et coopérer avec eux, afin de contribuer efficacement à une amélioration de la performance globale. Cette ouverture passe en premier lieu par une intégration du SI de maintenance dans le SI global de l'entreprise. Il s'agit d'intégrer "verticalement" le processus de maintenance avec le secteur décisionnel de l'entreprise et "horizontalement" avec le système de pilotage de la production.

Facilitée à l'heure actuelle par l'émergence et l'essor des TIC, la démarche d'intégration débouche sur le déploiement d'architectures de e-maintenance qui permettent à l'ensemble des acteurs du MCO d'accéder à tout moment à l'information dont ils ont besoin. L'exploitation de ces nouvelles architectures offre ainsi une perspective du développement d'approches de maintenance plus ambitieuses : distribuées, collaboratives, proactives...

Dans ce contexte, l'intérêt de combiner les notions de coopération et de proactivité au sein d'une seule démarche est évident. Initié par les travaux de [Léger, 1999], le développement d'un système intégré de maintenance prévisionnelle illustre bien le potentiel, mais aussi les difficultés d'implémentation, de ce type d'approche.

4. Conclusion

Avec l'émergence du développement durable, le défi actuel des industriels consiste à trouver le "meilleur" compromis entre les différents enjeux économiques, sociaux et environnementaux auxquels l'entreprise doit répondre. Ce défi se décline concrètement au niveau du système complexe d'exécution de la production par le concept de Maintien en Conditions Opérationnelles (MCO) devant garantir tout au long de la phase d'exploitation la finalité attendue du système par une maîtrise holistique de ses performances.

Toutefois, la mise en œuvre d'un processus de MCO adapté à ces exigences nécessite de faire évoluer son processus clé, la Maintenance, vers des aspects plus coopératifs et plus proactifs.

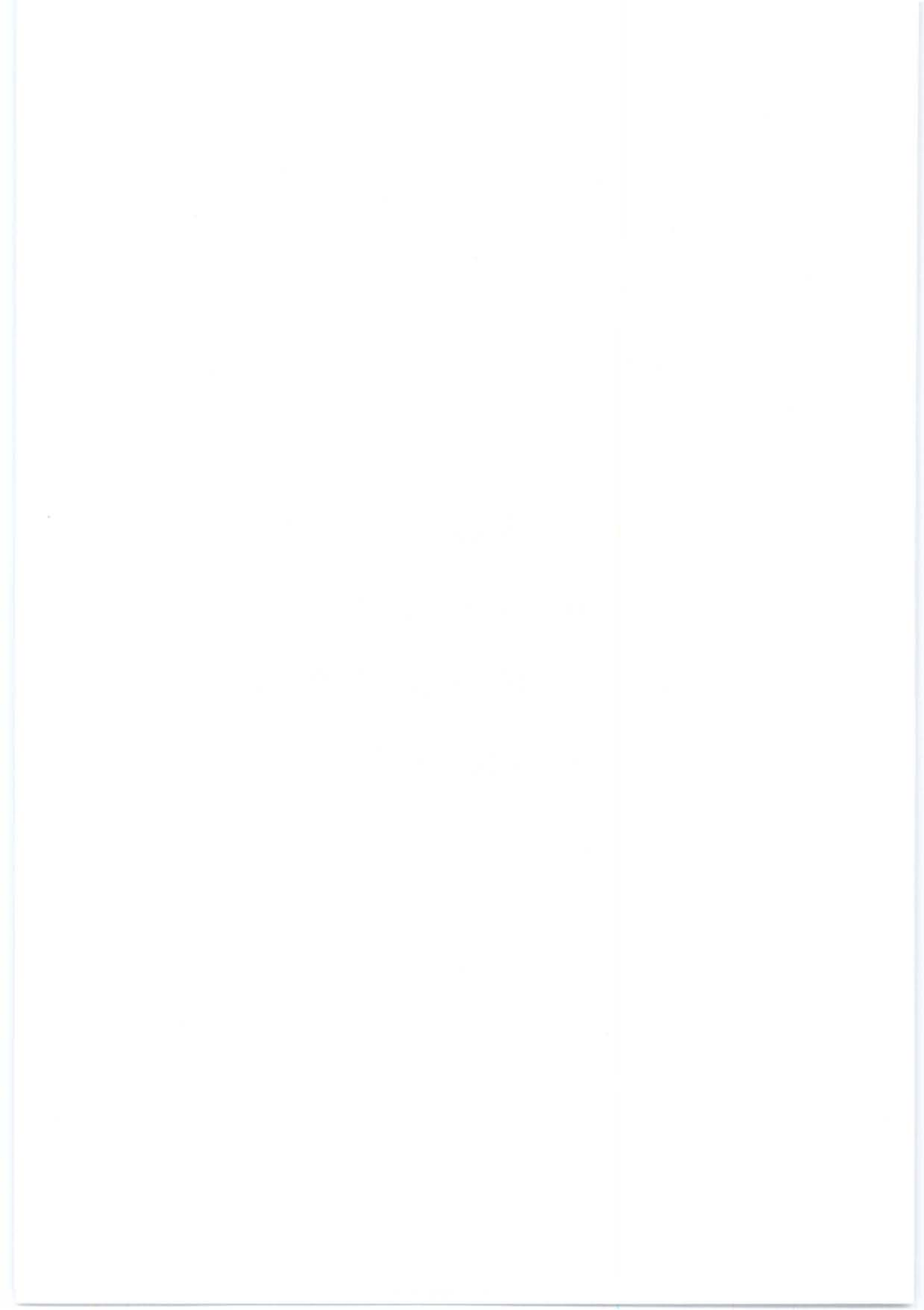
³² La sémantique est l'ensemble des relations entre les objets du modèle informationnel et leur signification, indépendamment de la façon de les employer ou de les interpréter.

Une des solutions possibles consiste à développer un Système Intégré de Maintenance Prévisionnelle (SIMP). Cependant, la mise en œuvre d'un SIMP est délicate aujourd'hui en raison du manque de formalisation de ses processus fondamentaux, de la difficulté d'intégration de ces processus dans un système cohérent et de la définition de l'ensemble du procédé de modélisation.

Dans ce contexte, notre contribution a pour objectif de formaliser le processus clé d'un SIMP : le processus de pronostic. Aussi, nous mettons en évidence, dans le chapitre II, les apports et les limites des contributions scientifiques et industrielles relatives au Pronostic suivant la classification d'approches de [Byington *et al.*, 2002].

Chapitre II

Le processus de pronostic :
processus clé d'un système
intégré de maintenance
prévisionnelle



II. Le processus de pronostic : processus clé d'un système intégré de maintenance prévisionnelle

1. Introduction

D'après la norme FD X60-000 [AFNOR, 2002], la mise en œuvre d'une stratégie de maintenance prévisionnelle nécessite :

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

Sur la base de ces préconisations, le système intégré de maintenance prévisionnelle doit ainsi remplir quatre fonctions : (1) Surveiller, (2) Diagnostiquer, (3) Pronostiquer l'état³³ du système de production [Léger, 1999] afin de proposer, dans le cadre d'une fonction d'Aide à la décision (4), la mise en œuvre du "meilleur" plan³⁴ de maintenance.

"In the maintenance context, the final step of making decisions about maintenance and mission planning should also be included, while developing prognostics, for more convenient traceability to top-level goals." [Mathur et al., 2001].

D'après la définition³⁵ du groupe de travail S3 (Sûreté, Surveillance, Supervision), les deux premières fonctions, interdépendantes, doivent être réalisées au sein d'un processus unique de Surveillance.

Ainsi, le SIMP est composé de trois processus : "Processus de Surveillance", "Processus de Pronostic" et "Processus d'Aide à la décision" intégrés selon le modèle de la Figure 16.

³³ L'état du système est défini comme l'aptitude de ce dernier à remplir les tâches définies par son exploitant. On distingue des états nominaux (le système remplit normalement sa mission), dégradés (accomplissement partiel de la mission ou diminution d'une performance attendue) ou défaillants (impossibilité d'exécuter la mission).

³⁴ Combinaison d'interventions à effectuer sur les composants du système de production.

³⁵ La surveillance est le traitement de l'ensemble des informations concernant le fonctionnement d'un processus, issues des instruments de mesure et émises par l'opérateur, pour la détection, la localisation et le diagnostic de défaillances, et pour le suivi des conditions de fonctionnement liées au vieillissement des composantes du processus et au changement de l'environnement. Définition donnée par le GT S3 sur <http://www.ensem.inpl-nancy.fr/~dmaquin/S3/>

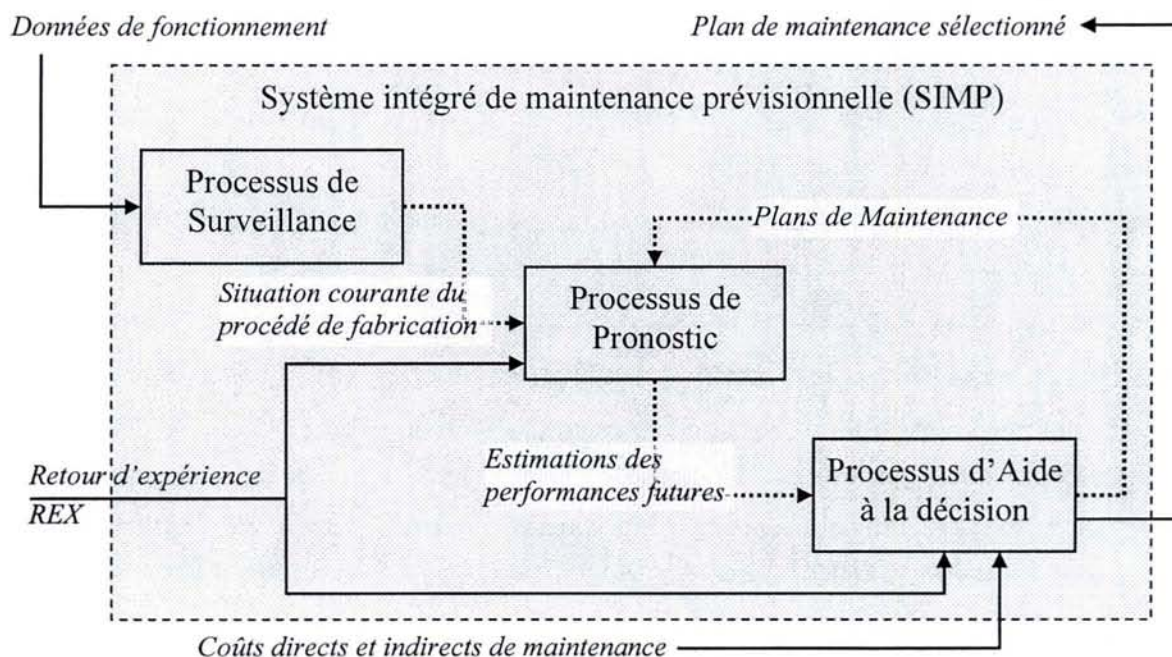
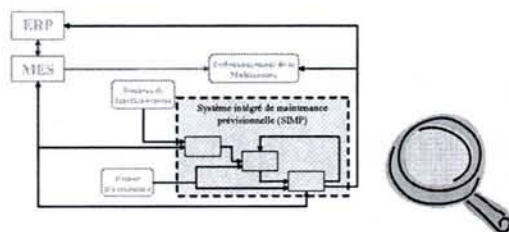


Figure 16 - Modèle de SIMP

Ce deuxième chapitre est consacré, dans un premier temps, à la définition et à la spécification du rôle de chaque processus au sein du SIMP.

Dans un second temps, nous focaliserons notre attention sur le processus de pronostic, dont la formalisation et la mise en œuvre constituent un verrou scientifique et technique à résoudre pour faciliter le déploiement industriel de la maintenance prévisionnelle. En ce sens, nous positionnerons les contributions scientifiques et industrielles relatives à la formalisation du processus en utilisant le cadre de référence introduit par [Lhoste, 1994].

Concept	<i>Idee abstraite et générale.</i>
Théorie	<i>Ensemble de règles, de lois qui servent de base à une science et qui donnent l'explication d'un grand nombre de faits.</i>
Modèle	<i>Approximation, vue partielle plus ou moins abstraite d'une partie du monde réel suivant un point de vue donné.</i>
Méthode	<i>Démarche raisonnée, suivie pour parvenir à un but.</i>
Méthodologie	<i>Ensemble cohérent de méthodes à mettre en œuvre, de manière coordonnée, pour atteindre un but complexe.</i>
Langage	<i>Moyen de communiquer des pensées sur la base d'un système de signes.</i>
Outil	<i>Moyen d'action, de mise en œuvre.</i>

Tableau 3 - Éléments de définition de la discipline Génie automatique [Lhoste, 1994]

2. Description des processus fondamentaux du SIMP

2.1. Le processus de surveillance

La surveillance industrielle est un dispositif passif qui détecte et classe les défaillances en observant l'évolution du système (processus de détection) puis les diagnostique en localisant les éléments défaillants et en identifiant les causes premières (processus de diagnostic). Les principales méthodes utilisées en Surveillance et Diagnostic sont synthétisées sur la Figure 17.

Dans le contexte de la maintenance prévisionnelle, le principe de base de la surveillance est d'apprécier le comportement dégradé d'un système en surveillant soit la déviation (de ses flux), soit la dégradation (de ses composants) [Léger, 1999].

Surveillance de déviation

La surveillance de déviation consiste à évaluer, sur la base d'une référence statique ou dynamique, l'anormalité ou la dérive d'une variation d'une propriété du système évoluant en fonction d'une échelle de temps continue.

Ainsi, [Ragot *et al.* 1990] ou [Basseville *et al.* 1996] ont défini des variables statistiques afin de déterminer des changements de caractéristiques par rapport à des valeurs de référence, ou par rapport à des valeurs mesurées à des instants passés dans une autre fenêtre temporelle.

De même, [Isermann *et al.* 1996], conscients de la complémentarité des modèles analytiques et heuristiques, ont proposé une implantation parallèle des traitements afin de disposer de variables mesurées par des capteurs et de variables observées par des opérateurs.

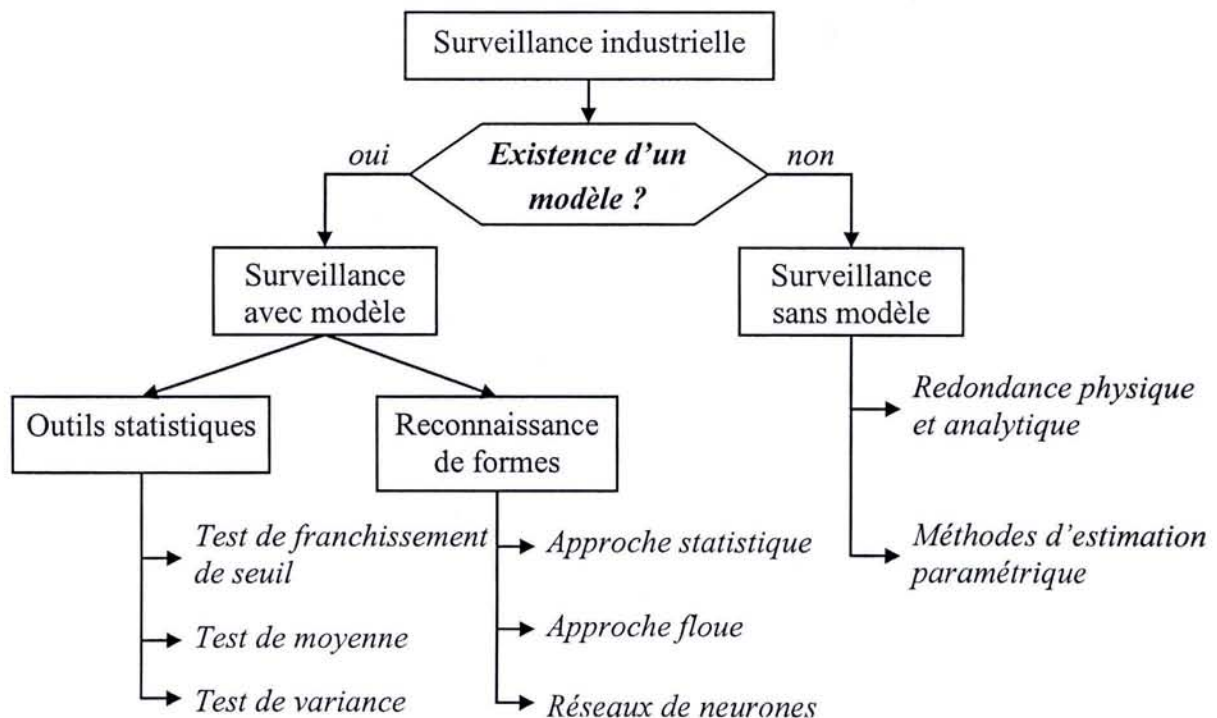


Figure 17 - Classification des méthodologies de surveillance industrielle [Zemouri, 2003]

Surveillance de dégradation

La surveillance de dégradation consiste, quant à elle, à évaluer, sur la base d'un comportement de référence du système, l'anormalité des états atteints par ce système. Dans le domaine des systèmes manufacturiers, [Roesch *et al.*, 1984] ont proposé le principe de surveillance d'état d'un système en insérant un filtre de comportement entre la partie commande et la partie opérative. Ce principe permet, entre autres fonctions, de comparer les comptes-rendus des états réels de la partie opérative par rapport aux états attendus. La surveillance de la dégradation a tout d'abord consisté à évaluer la dérive temporelle de transition entre deux états sur la base du modèle temporel du système. Cette mesure du comportement temporel portait initialement sur la mise en œuvre d'un compteur temporel basé sur le principe de type *chien de garde* comme repris en partie dans [Toguyeni, 1992] [El Khattabi, 1993] et [Nourelfath, 1997].

Diagnostic

Le sous-processus de diagnostic a pour objectif de localiser l'origine (la cause) des dégradations ou des déviations qui apparaissent sur le système. En général, il utilise les mêmes techniques et les mêmes méthodes que le sous-processus de détection associé. Si l'on dispose de signatures ou des modèles appropriés, cette localisation peut être automatisée. Sinon, il faut privilégier des techniques d'analyse de données, des procédures d'apprentissage et de reconnaissances de formes [Dubuisson, 1990], ou alors mettre en œuvre une démarche de raisonnement inverse (conséquence → causes) basée sur l'expertise humaine [Zwingelstein, 1995].

Les approches de diagnostic développées actuellement par la communauté de l'automatique se focalisent essentiellement sur les techniques de génération et de structuration des résidus ou sur des représentations multi-modèles³⁶.

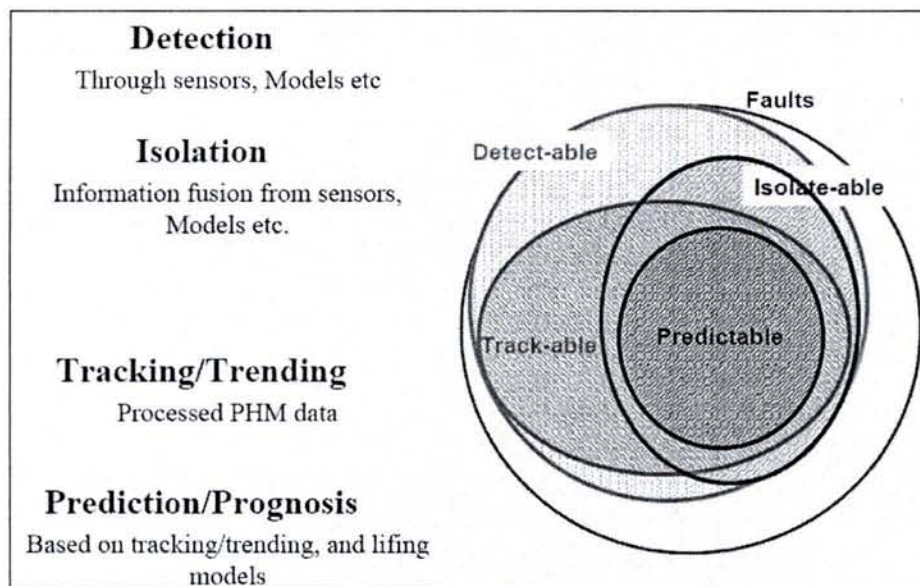


Figure 18 - Détection, Diagnostic & Pronostic [Hess, 2002]

³⁶ Un multi-modèle est une structure résultant de l'agrégation de modèles locaux ; cette structure est caractérisée par le nombre de modèles locaux, la structure de chaque modèle local, la nature de la fonction d'agrégation.

Actuellement, surveiller l'ensemble des dégradations potentielles d'une machine est irréaliste pour deux raisons majeures :

- en pratique, l'instrumentation disponible sur les systèmes de production est insuffisante,
- certaines dégradations sont techniquement inobservables ou alors impossible à diagnostiquer (Figure 18).

Ainsi, le processus de surveillance ne peut être mis en œuvre que sur un nombre restreint de causes de défaillances (les plus significatives).

2.2. Le processus de pronostic

Les processus de surveillance et de pronostic sont complémentaires : le premier évalue l'état présent du système, transmet l'information au second qui effectue la projection dans le futur.

"Diagnosis and prognosis are processes of assessment of a system's health. Diagnosis is an assessment about the current (and past) health of a system based on observed symptoms, and prognosis is an assessment of the future health." [Mathur et al., 2001]

C'est cette dernière définition que nous retiendrons pour l'instant, avant de proposer notre propre définition dans le chapitre III.

Le terme *pronostic* provient du grec *progignôskein* qui signifie "connaître à l'avance". C'est une notion essentiellement utilisée en médecine où il concerne la prévision, après le diagnostic, du degré de gravité et de l'évolution ultérieure d'une maladie, y compris son issue, en se référant à l'évolution habituellement observée pour des troubles similaires chez de nombreux autres patients. La définition précédente est transposable dans le cadre de la maintenance prévisionnelle de systèmes industriels, à condition de remplacer le patient par une machine. Ainsi, le rôle du pronostic consiste à prédire quel pourrait être l'état d'une installation industrielle dans le futur, au vu de son état actuel et passé (et éventuellement, en tenant compte de son usage futur). Les trois interprétations suivantes, issues du domaine de la maintenance, confirment ces propos :

- *"Prognostic is the ability to predict the future condition of a machine based on the current diagnostic state of the machinery and its available operating and failure history data."* [Byington et al., 2002]
- *"Prognostic is the ability to perform a reliable and sufficiently accurate prediction of the remaining useful life of equipment in service. The primary function of the prognostic is to project the current health state of equipment into the future taking into account estimates of future usage profiles."* [Lebold et al., 2001]
- *"In the industrial and manufacturing areas, prognosis is interpreted to answer the question: what is the remaining useful lifetime of a machine or a component once an impending failure condition is detected and identified."* [Wang P. et al., 1999]

Remarque : d'un point de vue "Surveillance / Diagnostic", la signification du pronostic n'est pas tout à fait la même. Le pronostic est assimilé à un diagnostic prédictif, qui s'exerce sur la dégradation et non pas sur la défaillance comme le diagnostic classique : *"L'objectif du pronostic*

(diagnostic prédictif) est d'identifier les causes et de localiser les organes qui ont entraîné une dégradation particulière" [Zemouri, 2003]. Nous estimons que cette définition n'est pas adaptée au contexte de la maintenance prévisionnelle, car elle n'inclut pas la dimension proactive de l'approche.

En fonction des besoins et des contraintes de maintenance, le pronostic correspond donc à :

- l'estimation du temps jusqu'à la défaillance et du risque d'apparition d'un ou de plusieurs autres modes de défaillance existants ou à venir [ISO, 2003] ;
- la durée de vie résiduelle d'un composant (traduction anglaise RUL : Remaining Useful Life) [Luo *et al.*, 2003], [Yan *et al.*, 2002]... ;
- la probabilité qu'une dégradation (défaillance) intervienne avant un instant donné...

Comme le futur ne peut être envisagé avec certitude, et que les données d'entrée du processus de pronostic sont elles-mêmes souvent entachées d'erreurs³⁷, il est indispensable de prendre en compte la notion d'incertitude en sortie du processus de pronostic : *"Uncertainty is central to any definition of prognosis. This is because a prognosis involves a projection into the future, and we argue that all such future projections must contain some uncertainty, since the future cannot be predicted with certainty."* [Provan, 2003]

Dans la mesure du possible, le résultat numérique du processus doit prendre en compte ce facteur. Un résultat numérique exact n'a pas de signification s'il n'est pas encadré par un intervalle de confiance (Figure 19). Si la propagation des incertitudes est difficile à traiter par des calculs analytiques, le recours à des outils de calculs numériques (simulation de Monte Carlo, par exemple) devient nécessaire [Byington *et al.*, 2004] (Figure 20).

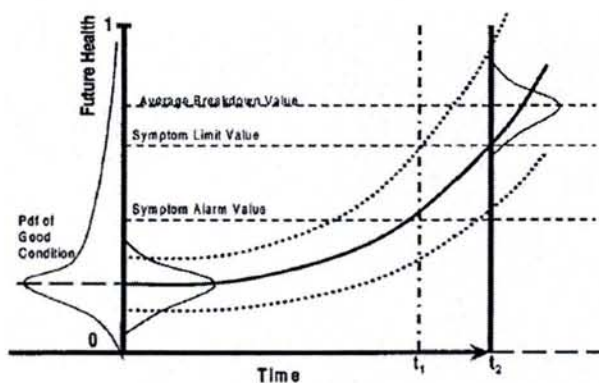


Figure 19 - Enveloppe d'incertitude associée à un pronostic [Provan, 2003]

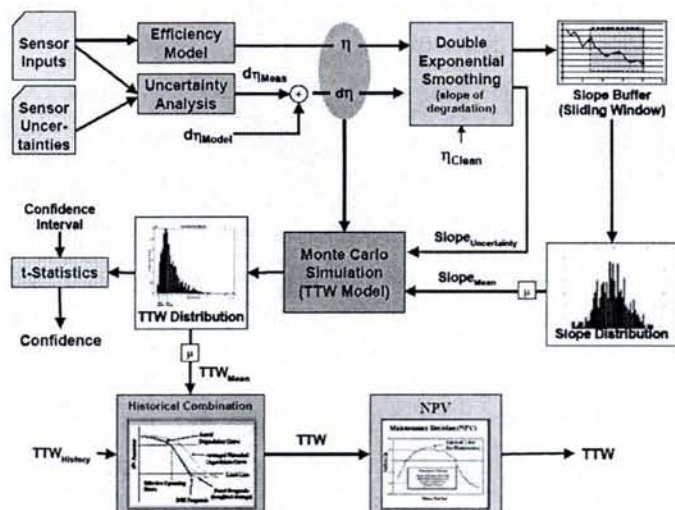


Figure 20 - Processus de pronostic des performances d'un compresseur [Byington *et al.*, 2004]

³⁷ En effet, les sources d'incertitudes qui émaillent le système de maintenance prévisionnelle sont nombreuses : incertitude sur les données collectées, sur le résultat du diagnostic, sur les paramètres du modèle de pronostic, sur les conditions opérationnelles et environnementales futures...

En définitive, le pronostic n'est pas une fin en soi, il doit déboucher sur le déclenchement direct ou différé d'interventions de maintenance. Ceci nécessite au préalable de sélectionner le meilleur plan de maintenance, à partir du pronostic de l'impact de chacun de ces plans sur les indicateurs de performances du système de production. Ce problème décisionnel est complexe [Mathur *et al.*, 2001] et il nécessite le développement d'un processus d'aide à la décision complémentaire au processus de pronostic.

2.3. Le processus d'aide à la décision

Le processus d'aide à la décision en maintenance est défini comme un ensemble d'activités et d'outils concourant au choix des meilleures stratégies de maintenance selon des critères prédéfinis [El Aoufir *et al.*, 2003].

Dans le contexte spécifique de la maintenance prévisionnelle, le processus d'aide à la décision intervient dès que le processus de surveillance détecte une dégradation significative de la performance globale du système de production ou lorsque l'estimation future des performances fournie par le processus de pronostic tend à mettre en évidence une dégradation.

Dans les deux cas, le rôle du processus d'aide à la décision est de proposer, puis de sélectionner un plan³⁸ de maintenance capable de rétablir un niveau de performance acceptable, au meilleur coût [Muller *et al.*, 2004d].

Ainsi, le processus décisionnel se déroule en trois étapes clés (Figure 16) :

- élaboration des plans de maintenance envisageables,
- estimation des performances futures du système associées à chaque plan,
- sélection du plan de maintenance qui possède le plus grand impact sur la performance globale (en tenant compte à la fois des coûts directs et indirects).

Elaboration des plans de maintenance

Le processus d'aide à la décision élabore en premier lieu l'ensemble des plans de maintenance permettant d'améliorer (ou de rétablir) l'état et les performances du système de production. Pour y parvenir, il doit prendre en compte les contraintes de production, les ressources humaines et matérielles disponibles de maintenance et l'ensemble des coûts associés (en collaboration avec le secteur décisionnel de l'entreprise) afin de déterminer quel équipement peut subir quelle action de maintenance et à quel moment (à partir de la situation courante).

Estimation des performances futures du système

Les scénarios de maintenance retenus sont ensuite transmis au processus de pronostic qui estime (a) le futur mode de fonctionnement et (b) les futures performances du système (point de vue

³⁸ Le plan de maintenance regroupe l'ensemble des interventions systématiques, conditionnelles ou prévisionnelles à réaliser sur les équipements du système de production durant la période de simulation.

exploitation) associées à chaque situation pronostiquée, en intégrant la part d'imprécision et d'incertitude inhérente aux connaissances disponibles.

Sélection du meilleur plan de maintenance

La dernière étape du processus décisionnel et, certainement, la plus difficile à réaliser consiste à trouver le meilleur compromis au regard de la performance globale et sous les contraintes spécifiques du MCO du système de production entre les différents plans présélectionnés.

Pour y parvenir, il est nécessaire au préalable de sélectionner et de déterminer le poids des critères de performance et des acteurs du MCO concernés par la stratégie de maintenance [Triantaphyllou *et al.*, 1997].

Ensuite, le choix du meilleur plan s'apparente à un problème classique d'optimisation de la maintenance [Dekker *et al.*, 1998], caractérisé par une formulation mathématique du comportement du système et de la maintenance et par la recherche d'une solution optimale issue d'un calcul analytique [Bérenguer *et al.*, 1997], [Barros, 2004], d'un algorithme de recherche [Harrath *et al.*, 2003] ou d'une simulation [Marseguerra *et al.*, 2004].

Au niveau opérationnel, les méthodes et les modèles proposés répondent rarement aux besoins des industriels pour deux principales raisons :

- La "simplicité" et le manque de généricité des modèles. En raison d'hypothèses de travail trop contraignantes ou bien de problèmes de calcul insurmontables, il existe généralement un écart sensible entre le degré de complexité des systèmes modélisés par la communauté académique et celui d'un système de production réel. La plupart des approches proposées dans la littérature sont ainsi orientées composant. *"Traditional availability assessment of process systems provides quantitative information on the characteristics of the maintenance policy to be followed, based on the system reliability model but without taking into account detailed process interactions, the process model complexity, and the uncertainty which may be involved in a number of model and process parameters."* [Vassilisadis, 2001]
- La complexité de la prise de décision multicritère. Les modèles théoriques classiques d'optimisation sont basés sur une fonction coût unique et monocritère alors que la performance globale à optimiser est par définition (§I) multicritère, multi-acteurs, placée dans un environnement incertain. Par ailleurs, ces méthodes font l'hypothèse qu'une solution optimale existe alors que dans la réalité pratique de la maintenance, étant donné la multiplicité des critères, la solution la plus adaptée est plutôt un compromis [El Aoufir *et al.*, 2003]. Par conséquent, l'exploitation des méthodes et des outils d'"Aide à la décision multicritère" [Zanakis *et al.*, 1998] dans le contexte spécifique de la Maintenance s'impose. De nombreuses approches ont déjà été proposées : agrégation des critères [Serquin *et al.*, 1996], méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) [Bevilacqua *et al.*, 2000], utilisation de la logique floue [Al Najjar *et al.*, 2003], réseaux bayésiens [Bouissou *et al.*, 2002] ou diagrammes d'influence [Weber *et al.*, 2001].

3. Le pronostic : talon d'Achille de la maintenance prévisionnelle

Parmi les processus précédemment développés, le processus de pronostic est l'élément clé de la stratégie de maintenance prévisionnelle car il supporte la notion d'anticipation qui caractérise une approche proactive [Wang P. *et al.*, 1999]. Paradoxalement, il est aussi identifié comme le moins avancé en terme de formalisation et d'intégration : *"Le pronostic de l'évolution de la dégradation est aujourd'hui une science très difficile qui reste encore un domaine très balbutiant."* [ZwingeZstein, 1995], *"Prognosis is one of the least understood aspects of CBM"* [Provan, 2002], *"While diagnostics, the science dealing with diagnosis, has existed as a discipline in medicine, and in system maintenance and failure analysis, prognostics is a relatively new area of research."* [Mathur *et al.*, 2001]

L'intégration du processus de pronostic dans le système de maintenance prévisionnelle, sa modélisation et la formalisation de son principe de construction constituent aussi bien des problématiques académiques [GT MACOD, 2003] qu'industrielles [Byington *et al.*, 2004].

3.1. Intégration du processus de pronostic dans le SIMP

À l'image du module spécifique d'OSA-CBM [Thurston *et al.*, 2001], le processus de pronostic consomme une quantité importante d'informations issues de modules situés en amont (surveillance, REX) ou en aval (aide à la décision) de l'architecture de maintenance prévisionnelle (Figure 21).

Les informations d'entrée du processus de pronostic sont présentées ci-dessous selon leur origine chronologique :

- connaissance du passé : historique de l'évolution du système (suivi des paramètres de fonctionnement, défaillance, conditions d'utilisation, action de maintenance...),
- connaissance du présent : surveillance de l'état courant (déviations ou dégradations détectées, causes de ses déviations ou dégradations identifiées, conditions d'utilisation, propriétés physiques, pièces de rechanges disponibles...),
- connaissance du futur : prévisions des conditions d'utilisation (sollicitations, mode de fonctionnement, environnement...) et des interventions de maintenance à effectuer sur la période de simulation.

A partir de ces informations, le processus de pronostic exécute des algorithmes de traitements qui déterminent les performances futures du système de production pour chaque scénario de maintenance défini par le processus d'aide à la décision. Ainsi, le processus de pronostic peut être réitéré plusieurs fois jusqu'à l'obtention d'un plan de maintenance qui respecte les exigences de performances du MCO.

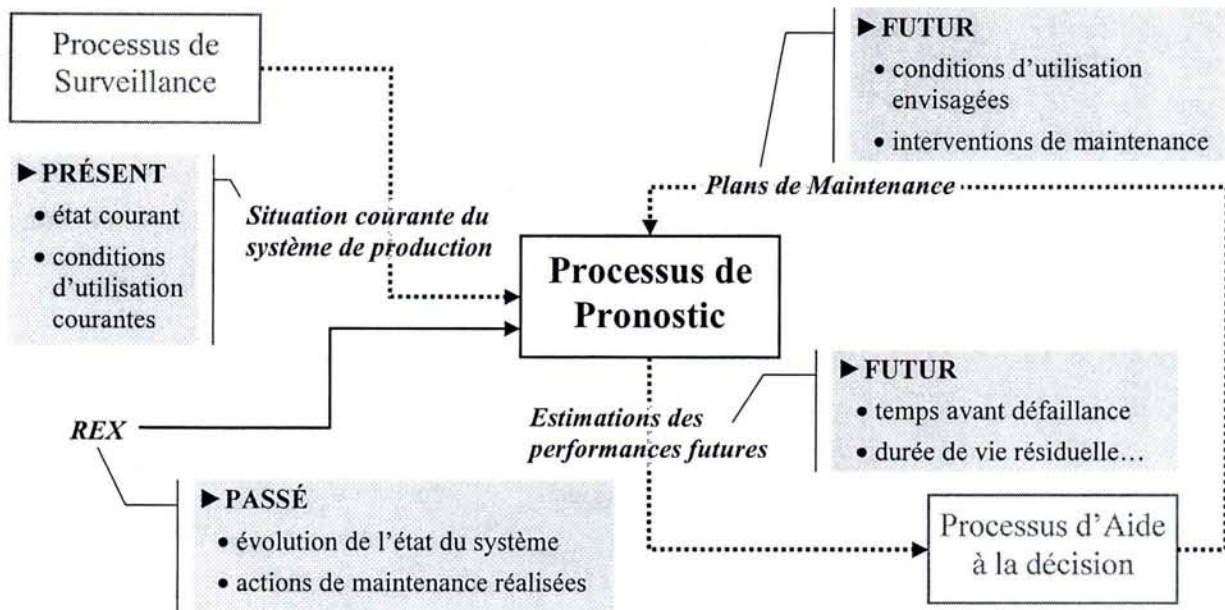


Figure 21 - Intégration du processus de pronostic dans le SIMP

3.2. Formalisation du processus de pronostic

Le processus de pronostic repose sur un ensemble de traitements et/ou d'algorithmes à exécuter à partir des informations d'entrée pour produire le résultat attendu. D'après [Byington *et al.*, 2003], les méthodologies de pronostic sont divisées en trois groupes (Figure 22) :

- approches exploitant un modèle physique,
- approches guidées par les données,
- approches basées sur l'expérience.

Cette classification est la base de l'étude et de la synthèse des travaux relatifs à la formalisation et à la mise en œuvre du processus de pronostic que nous proposons maintenant.

Pour déterminer quelles sont les méthodologies de pronostic adaptées à un système donné, il faut répondre à deux questions :

1. Est-il possible de construire un modèle physique des mécanismes de dégradation ?
 2. Y a-t-il une instrumentation suffisante et des processus de surveillance/diagnostic, capables d'évaluer en continu l'état du système ?
- Si la réponse à la première question est positive, l'identification des lois physiques qui régissent l'évolution de la dégradation du système est possible. Par conséquent, il est concevable d'implémenter une approche de pronostic basée sur un modèle [Luo *et al.*, 2003].
 - Si la réponse à la deuxième question est positive, le développement d'une approche guidée par les données est envisageable. Le principe de ce type d'approche est d'extrapoler la valeur courante d'un indicateur de dégradation élaboré à partir de données de surveillance et d'un modèle mathématique de prévision [Azam *et al.*, 2002].

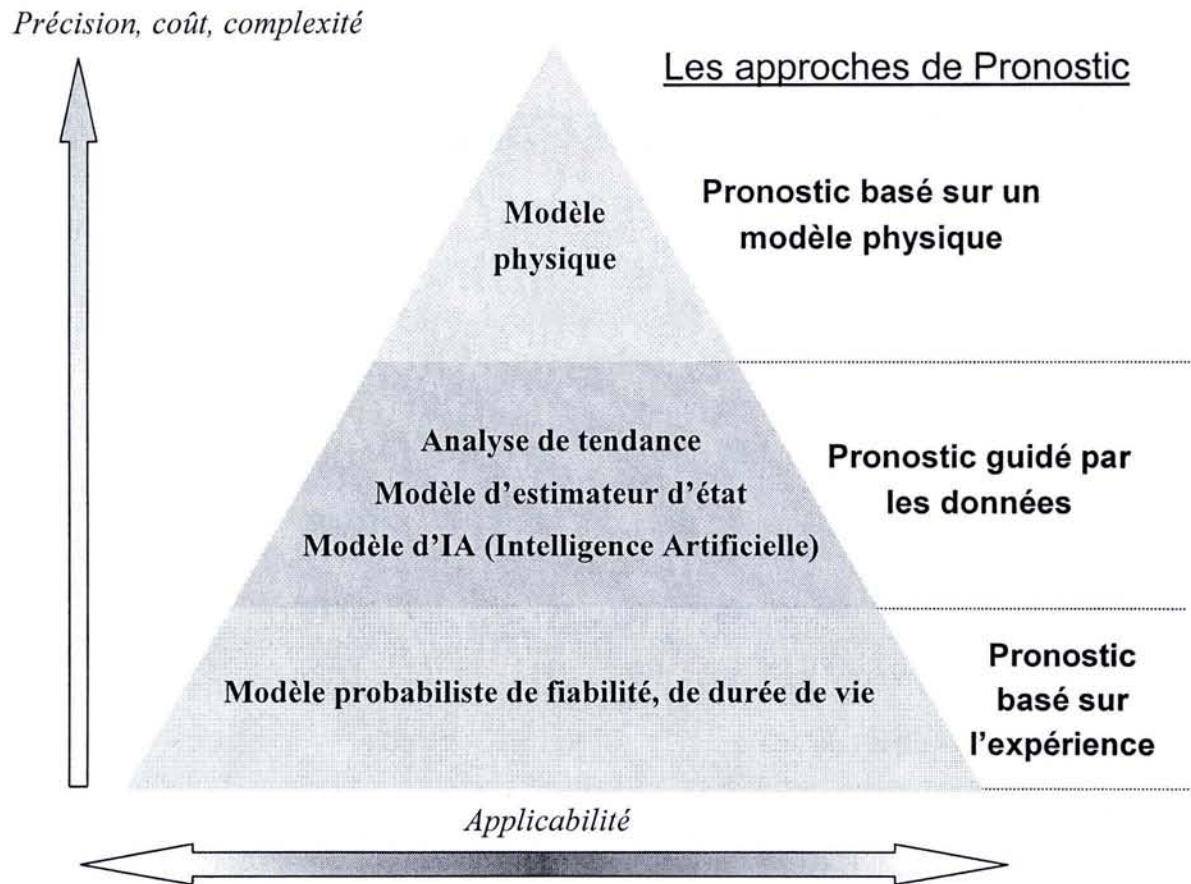


Figure 22 - Classification des approches de pronostic d'après [Byington *et al.*, 2003] et [Lebold *et al.*, 2001]

- Enfin, si les deux réponses sont négatives, la mise en œuvre d'un pronostic basé sur l'expérience est la seule alternative possible. Dans ce cas, le processus de traitement fait appel à une loi de fiabilité $R(t)$ ou à un processus de détérioration $\{X_t\}$ établi à partir du retour d'expérience ou de connaissances expertes [Sutherland *et al.*, 2002].

3.2.1. Les approches basées sur des modèles physiques

Le pronostic basé sur un modèle physique suppose qu'une représentation mathématique du mécanisme de dégradation est disponible [Luo *et al.*, 2003]. Dans une approche de ce type, la dégradation est considérée comme une variable continue dont l'évolution est déterminée par une loi déterministe ou stochastique. Le composant entre dans un état défaillant lorsque la variable de dégradation atteint un seuil prédéfini.

3.2.1.1. Concepts

L'expression "pronostic basé sur un modèle physique" est issue de la traduction des termes anglo-saxons "Model-based Prognostic" ou "Physics of failure based Prognostic" [Byington *et al.*, 2003]. Le pronostic consiste à faire évoluer le modèle physique jusqu'à l'instant futur demandé, à partir d'un état de détérioration initial et de conditions futures d'utilisation du composant.

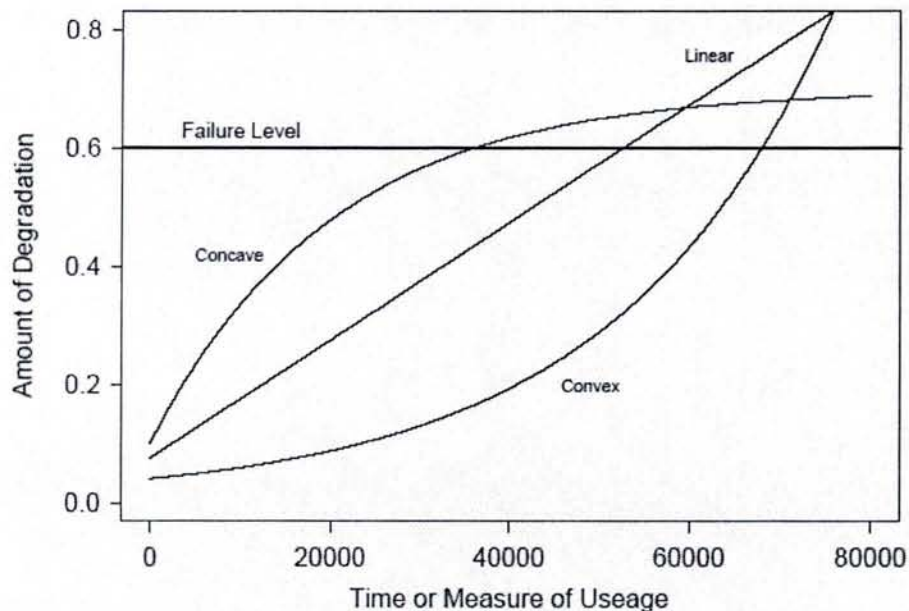


Figure 23 - Formes possibles pour une courbe de dégradation univariée

3.2.1.2. Modèles

Chaque discipline scientifique possède ses propres mécanismes de dégradation (vieillessement, fatigue, corrosion, érosion...) et donc ses propres modèles. Toutefois, quel que soit le phénomène concerné, la courbe d'évolution d'une dégradation adopte une trajectoire linéaire, convexe ou concave (Figure 23).

Le processus de dégradation est modélisé dans un premier temps de manière déterministe, sous forme d'équation(s) différentielle(s). Le modèle devient stochastique à partir du moment où l'on prend en compte l'existence d'incertitudes sur les conditions initiales et les paramètres.

Le Tableau 4 présente trois modèles simples de dégradation issus de [Meeker *et al.*, 1998]. Par exemple, des modèles physiques existent relativement aux processus de corrosion en chimie [Hall *et al.*, 2003], d'érosion [Meng *et al.*, 1995] ou de fatigue [Lee *et al.*, 1996] en mécanique...

Dégradation	Linéaire	Convexe	Concave
Nom du modèle	-	Paris-rule	-
Application	Usure pneumatique	Cassure par fatigue	Défaillance de circuits imprimés par court-circuit
Equation caractéristique	$D(t) = D(0) + C * t$	$\frac{da(t)}{dt} = C * [\Delta K(a)]^m$	$\frac{dA_1}{dt} = -k_1 A_1, \frac{dA_2}{dt} = k_1 A_1$
	$D(t)$: taux d'usure	$a(t)$: taille de la cassure	$A_1(t)$: quantité de Cl
	C : coefficient du matériau	C, m : propriétés matériau	$A_2(t)$: quantité de ClCu
		$\Delta K(a)$: fonction de la géométrie, des contraintes, des dimensions de la pièce	k_1 : taux de transformation du chlore (Cl) en chlorure de cuivre (ClCu)

Tableau 4 - Exemples de processus de dégradation

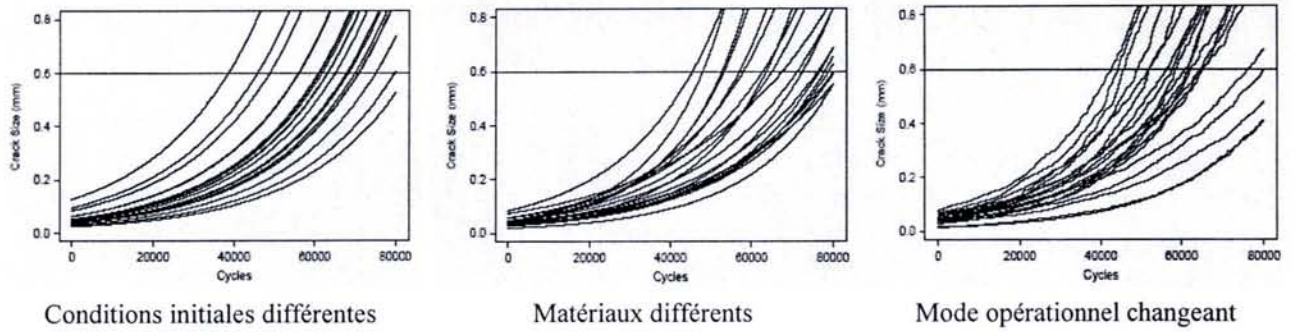


Figure 24 - Modification de la loi de dégradation en fonction des facteurs influents [Meeker *et al.*, 1998]

Avant d'exploiter un modèle, il est indispensable de lister les principaux facteurs qui génèrent une variabilité dans la trajectoire de la dégradation, et donc modifient l'estimation du temps qui précède la défaillance (Figure 24).

[Meeker *et al.*, 1998] distinguent deux types de facteurs : ceux qui appartiennent au composant en lui-même et ceux qui relèvent des conditions opérationnelles et environnementales d'utilisation. La première catégorie est composée de l'état initial de dégradation, des propriétés du composant (caractéristiques géométriques, chimiques...). La seconde comporte les contraintes d'utilisations (régime, mode de fonctionnement...) et les caractéristiques de l'environnement (température, humidité, ondes magnétiques...).

3.2.1.3. Méthodes / Methodologies

Le déploiement d'une approche basée sur un modèle passe par les étapes suivantes :

- construction du modèle d'évolution du système (dégradation incluse) et détermination des seuils de défaillance,
- développement d'une méthode de résolution du système d'équations différentielles permettant d'obtenir une fonction de fiabilité,
- si possible, mise en place d'un dispositif de surveillance / diagnostic qui permet d'évaluer la valeur courante de la dégradation.

La méthodologie générique développée par [Luo *et al.*, 2003] respecte ce principe de fonctionnement (Figure 25a).

La première phase de l'étude modélise mathématiquement le comportement du système et de son processus de dégradation par un système d'équations différentielles de la forme suivante :

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, \lambda(\theta), u) & (1) \\ \dot{\theta} = \varepsilon g(\theta, x) & (2) \\ y = Cx + Du + v & (3) \end{cases}$$

avec : x variable d'état du système, θ variable liée à la dégradation, u entrée du système, ε échelle de temps, λ vecteur de paramètres, y sortie du système et v bruit de mesure.

Comme chaque paramètre est incertain, et donc représenté par une distribution de probabilités, la résolution analytique du système est impossible. Ainsi, pour chaque mode de fonctionnement, une simulation de Monte Carlo est exécutée et fournit l'évolution de la dégradation en fonction du temps d'utilisation (Figure 25b).

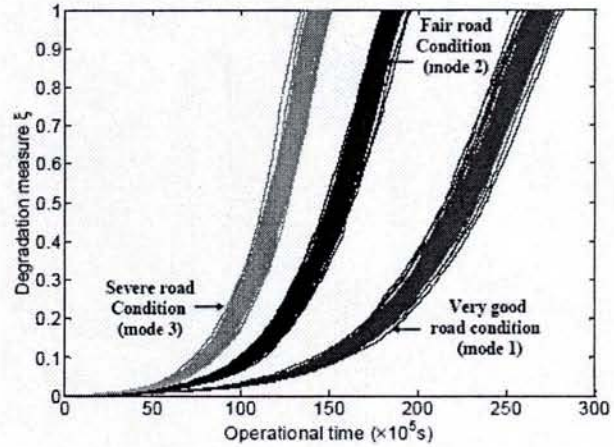
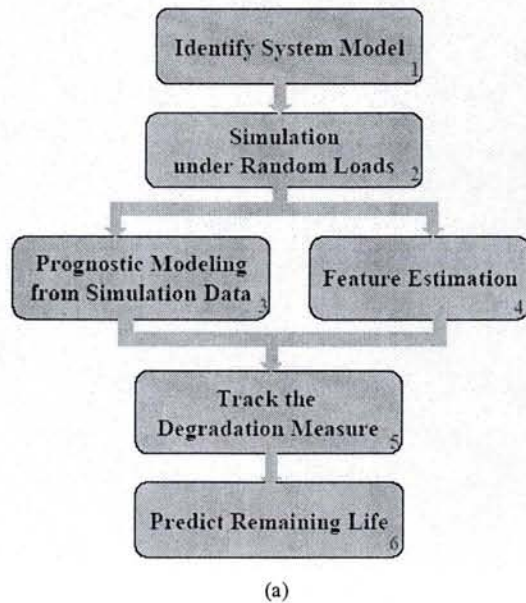


Figure 25 - Processus de pronostic basé sur un modèle [Luo *et al.*, 2003]

Ensuite, le processus de diagnostic détermine le niveau de détérioration courant du système à partir des mesures collectées sur le système réel. Dans le même temps, les conditions futures d'utilisation du système sont déterminées à partir d'un processus stochastique d'évolution. Pour finir, le pronostic est réalisé à partir du niveau de détérioration courant, en combinant la durée de vie restante du composant estimée pour chaque mode et le temps moyen de séjour dans chacun d'entre eux.

[Chelidze *et al.*, 2003] proposent une méthodologie assez proche de la précédente. Ils modélisent la perte progressive de tension d'une pile 9V dans un oscillateur électromécanique (Figure 26a) avec un modèle d'évolution "fast-time" du système (4) couplé avec un modèle d'évolution "slow-time" de la dégradation (5).

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, \mu(\phi)) \\ \dot{\phi} = \varepsilon g(\phi, x) \end{cases} \quad (4)$$

avec : x variable observable du système, ϕ variable (cachée) liée à la dégradation, μ fonction des paramètres du matériau, ε échelle de temps.

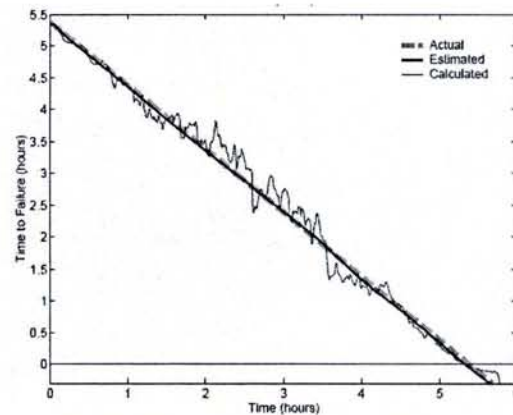
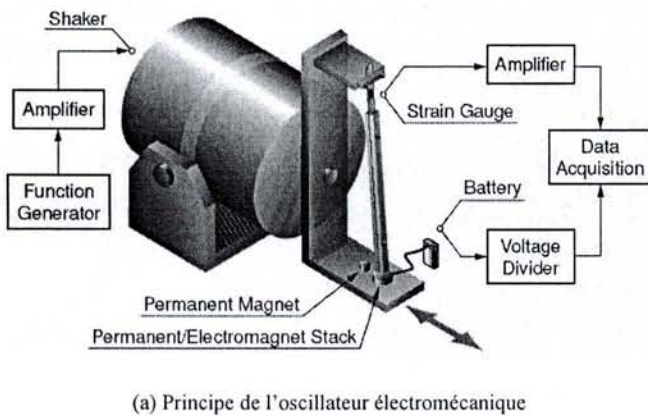


Figure 26 - Démarche de pronostic de la défaillance de systèmes dynamiques [Chelidze *et al.*, 2003]

Un filtre de Kalman détermine la valeur courante de la dégradation ϕ_{TC} en fonction des observations collectées. Puis, l'estimation du temps qui précède la défaillance t_F (Figure 26b) est réalisée en solutionnant les équations (6) :

$$\dot{\phi} = \bar{g}(\phi) \Leftrightarrow t_F = \int_{\phi_{rc}}^{\phi_F} \frac{d\phi}{g(\phi)} \quad (6)$$

$\bar{g}(\phi)$: "moyenne" de g obtenue lors du passage de (5) à (6)

Au travers d'applications récentes, la communauté "Maintenance" a également manifesté un intérêt certain vis-à-vis des modèles physiques de dégradation :

- [Ray, 1999] adopte le modèle stochastique de fatigue Newman pour planifier les interventions de maintenance (surveillance et réparation) sur des structures mécaniques.
- [Rafiq *et al.*, 2004] s'intéressent à la détérioration de ponts causés par un processus d'induction de chlore. Une démarche bayésienne est mise en œuvre pour actualiser le modèle stochastique.
- [Hall *et al.*, 2003] pronostiquent la durée de vie restante de circuits imprimés et de pipelines soumis à des phénomènes de corrosion. Pour cela, ils déploient une méthodologie basée sur des modèles stochastiques de dégradation (Eyring-Peck et PCG) dont les paramètres sont incertains. La distribution des temps de défaillance est obtenue par simulation de Monte Carlo puis approximée par une loi de Weibull.

3.2.2. Le pronostic guidé par les données

Le pronostic guidé par les données est basé sur l'exploitation de symptômes ou bien d'indicateurs de la dégradation dont l'évolution future est déterminée grâce à une méthode statistique (analyse de tendance, intelligence artificielle, estimateur d'état...).

3.2.2.1. Concept

L'expression "pronostic guidé par les données" vient de l'anglais : "data-driven prognostic" [Luo *et al.*, 2003]. Elle est assimilable aussi à la notion de diagnostic prédictif, terme habituellement utilisé par la communauté Surveillance / Diagnostic pour désigner globalement le pronostic.

Le diagnostic prédictif consiste à identifier l'origine d'une dégradation puis à mettre en œuvre une technique de prédiction de séries temporelles pour obtenir l'évolution future du système [Zemouri, 2003].

3.2.2.2. Théorie

L'approche guidée par les données est basée sur l'utilisation directe des données de surveillance ou indirecte par l'intermédiaire d'indicateurs, sans recours à un modèle physique du comportement du système. L'indicateur est un événement, un fait observable, mesurable et déterminé par un calcul qui identifie de façon qualitative ou quantitative l'état de détérioration d'un composant [Knezevic, 1987].

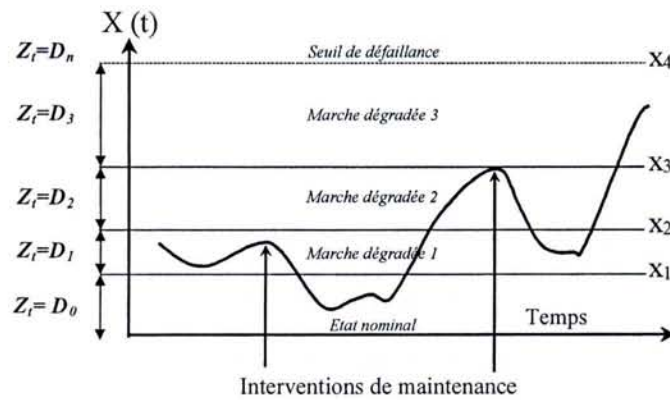


Figure 27 - Indicateur de dégradation [Muller *et al.*, 2003]

Dans [Muller *et al.*, 2003], nous avons, par exemple, formalisé l'indicateur par une variable discrète Z_i dont l'état D_i est défini instantanément à partir de la surveillance d'un (ou plusieurs) paramètre(s) caractéristique(s) de la dégradation³⁹ (Figure 27).

La réalisation du pronostic dans le cadre d'une approche basée sur les données consiste à extrapoler l'évolution des paramètres de surveillance et/ou des indicateurs de dégradation. Il s'agit d'utiliser des modèles statistiques d'analyse de tendance ou alors d'exploiter les techniques mises en œuvre par le sous-processus de diagnostic [Zwingelstein, 1995] à des fins de pronostic.

Dans ce cas, le pronostic guidé par les données est proche de la théorie du traitement du signal, de la reconnaissance de formes [Dubuisson, 1990] ou des modèles analytiques d'estimation, de filtrage...

3.2.2.3. Méthodes / Méthodologies

Les trois catégories de méthodologies de pronostic guidé par les données recensées par [Byington *et al.*, 2004] se distinguent par le type de modèle qu'elles utilisent :

- Pronostic par analyse de tendance : "Evolutionary/Feature-based prognostic" (exploitation de modèles statistiques).
- Pronostic par apprentissage automatique : "Machine learning / AI - based prognostic" (exploitation de modèles de type boîte noire issus de l'intelligence artificielle).
- Pronostic basé sur un estimateur d'état : "State estimator prognostic" (exploitation d'estimateurs d'état).

Le pronostic par analyse de tendance

Le principe du pronostic par analyse de tendance (Figure 28) peut être décrit par le schéma classique suivant : extraction d'indicateur(s) ("feature" en anglais) de la dégradation à partir des données collectées, estimation de l'état courant du composant (suite à une possible classification), évaluation de la trajectoire future jusqu'à un état redouté (dégradé ou défaillant).

³⁹ Dans l'exemple traité, l'indicateur Z_i est de nature "monovariable", son état est lié directement à la valeur du paramètre physique $X(t)$; les états de l'indicateur sont ainsi déterminés par des seuils significatifs.

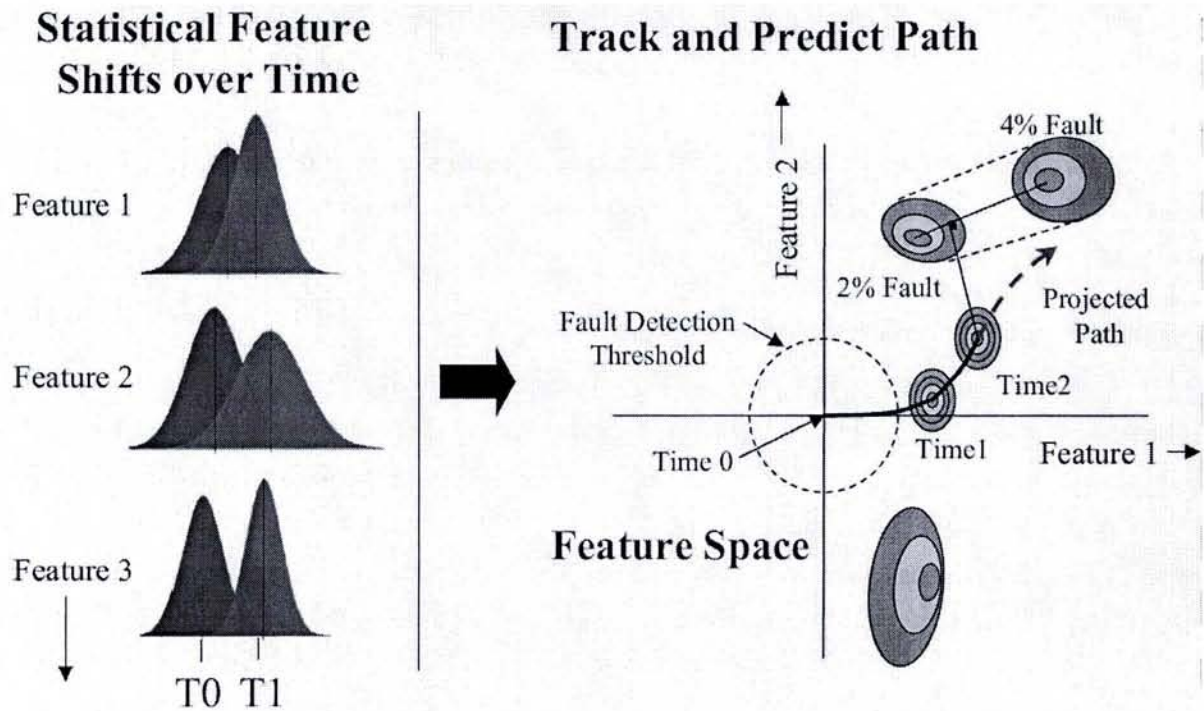


Figure 28 - Pronostic par analyse de tendance [Byington *et al.*, 2002]

La démarche est supportée par une grande variété de méthodes statistiques choisies principalement en fonction du nombre d'indicateurs de dégradation et de modes de défaillance. La gamme de modèles utilisés s'étend du simple outil de prévision de séries temporelles (Box & Jenkins, régression linéaire, lissage exponentiel [Box *et al.*, 1994]) aux modèles de classification multivariable les plus perfectionnés (analyse en composantes principales, discrimination linéaire et quadratique, PLS...) [Azam *et al.*, 2002].

Quelques applications intéressantes récentes sont citées ci-dessous :

- [Greitzer *et al.*, 2002] ont développé, pour l'armée américaine, un système embarqué de pronostic par analyse de tendance (Figure 29). Son fonctionnement repose sur une méthode de régression mise en œuvre sur l'évolution de l'indicateur FOM (Figure of Merit). Le nombre de points utilisés par la fonction de régression varie pour que la prévision reste cohérente par rapport aux dernières mesures.

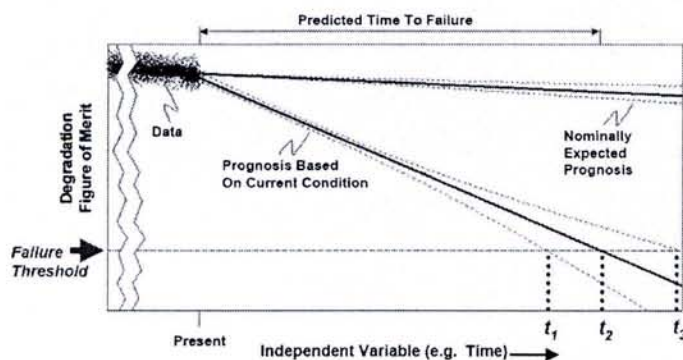


Figure 29 - Estimation du temps de défaillance par droite de régression [Greitzer *et al.*, 2002]

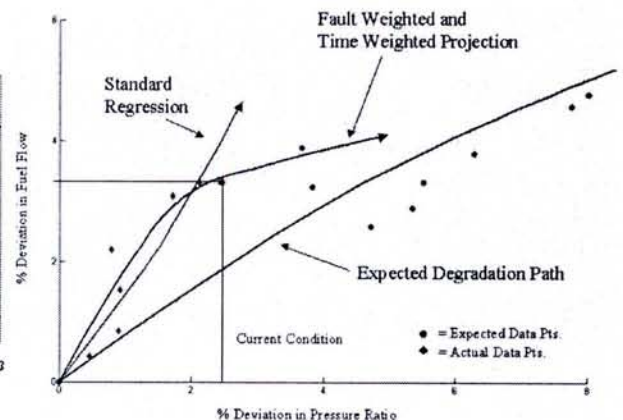


Figure 30 - Prévision du taux de dégradation [Kacprzyński *et al.*, 2002]

- Cette notion de réactivité est également présente dans les travaux de [Yan *et al.*, 2002] où le pronostic est réalisé par un modèle de prédiction ARMA (Autorégressif à moyenne mobile) dont les paramètres sont remis à jour *on line*.
- Enfin, [Kacprzyński *et al.*, 2002] utilisent une méthode de double lissage exponentiel qui combine l'évolution courante de la dégradation avec une trajectoire *a priori* définie par expérience (Figure 30).

Le pronostic par apprentissage automatique

Actuellement, les méthodologies de pronostic guidé par les données les plus populaires sont basées sur des modèles issus de l'intelligence artificielle (Figure 31). Leur principe de base est d'apprendre implicitement les scénarios de dégradation/défaillance à travers les paramètres du modèle.

Les applications récentes exploitent des réseaux de neurones sous toutes leurs formes : réseau de neurones à ondelettes dynamiques [Wang X. *et al.*, 2002], réseau de neurones à fonctions de base radiales [Zemouri, 2003] ou réseau neuro-flou [Wang W. *et al.*, 2003]. L'intégration de la logique floue dans la construction du modèle permet de définir la structure du modèle et d'assurer la convergence de l'apprentissage des paramètres.

Ces méthodes d'apprentissage automatique ont donné lieu à de multiples applications :

- pronostic de défaillances de roulements à billes [Wang P. *et al.*, 1999],
- pronostic de fissures des engrenages (Figure 32) [Wang W. *et al.*, 2003],
- pronostic de l'état d'un système non-linéaire (four à gaz) [Zemouri *et al.*, 2002] (Figure 33).

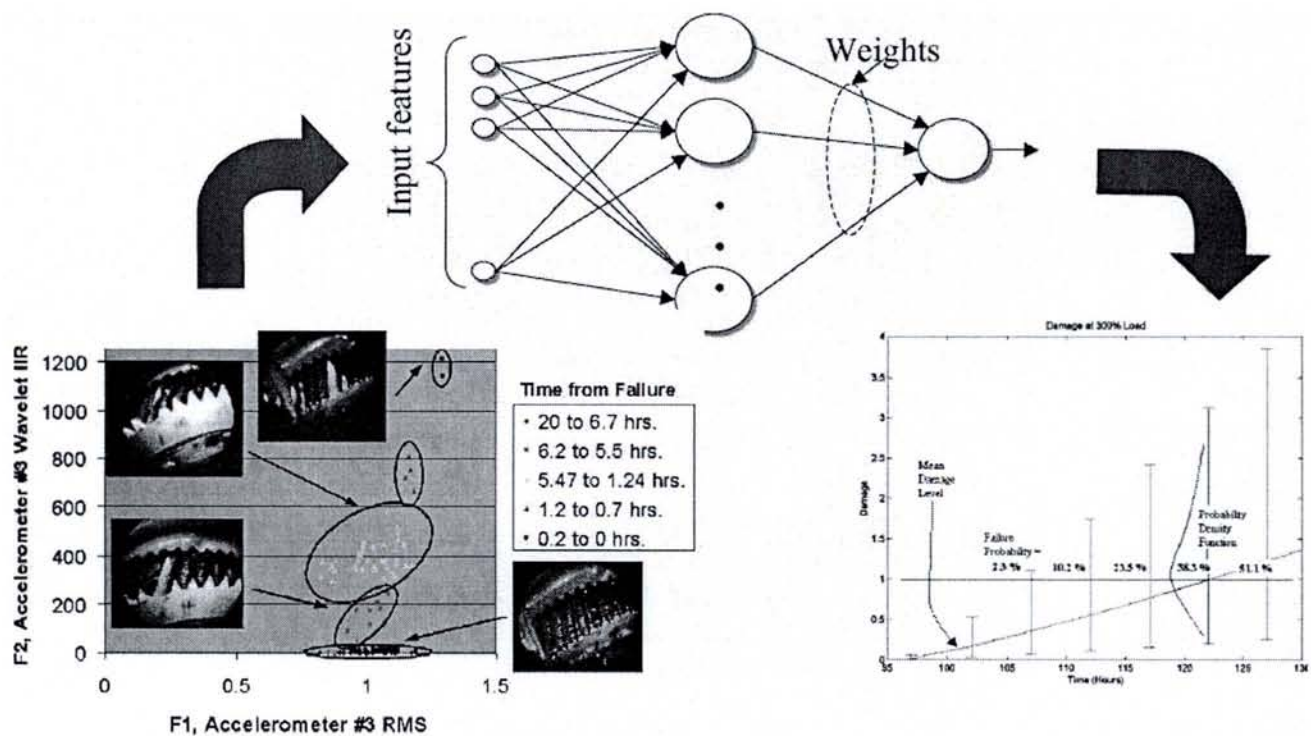


Figure 31 - Pronostic par apprentissage (IA) [Byington *et al.*, 2002]

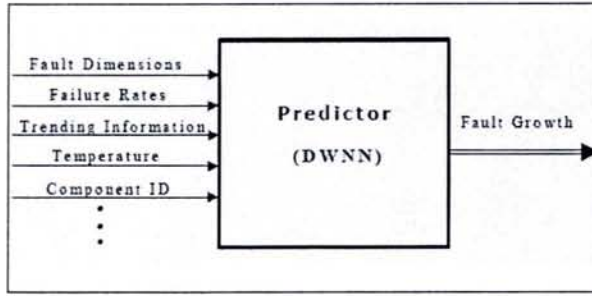


Figure 32 - Schéma de représentation du processus de prédiction DWNN [Wang P. *et al.*, 1999]

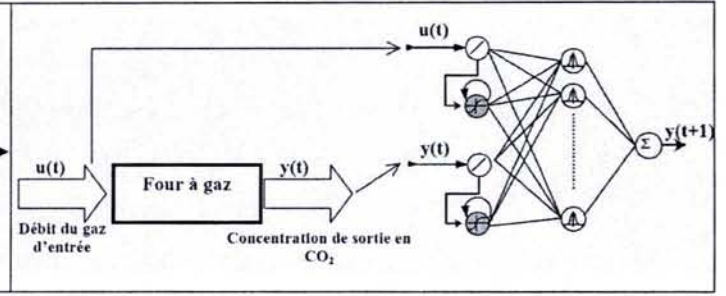


Figure 33 - Pronostic d'un four à gaz par le réseau de neurones RRFR [Zemouri *et al.*, 2002]

Il est important de noter que l'efficacité de cette méthode de pronostic dépend fortement de la qualité du jeu de données d'apprentissage. En effet, l'absence d'un scénario de dégradation/défaillance dans l'historique rend le modèle inefficace en cas d'occurrence de ce scénario.

Le pronostic basé sur un estimateur d'état

Les méthodes basées sur un estimateur d'état sont utilisées notamment lorsqu'un diagnostic par reconnaissance de formes est mis en œuvre au préalable [Denœux *et al.*, 1997]. Particulièrement adapté aux systèmes soumis à des mécanismes de dégradation lents, le pronostic consiste à prédire l'évolution de la trajectoire de la forme (indicateur de dégradation) par l'intermédiaire d'un filtre de Kalman (Figure 34).

Le système est modélisé par un processus stochastique à temps discret représenté par le système d'équations d'état suivant :

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_k x_k + w_k \\ z_k = x_k \end{cases} \quad (7)$$

$$(8)$$

La matrice de transition A_k contient les paramètres du modèle. En utilisant les équations du filtre de Kalman et la séquence des observations $x_0, x_1 \dots x_k$, il est possible de prédire l'évolution de la séquence $\{\hat{x}_{k+i}, i = 1, h\}$, et donc le pronostic [Gana, 1987], [Frélicot, 1996]. Récemment, les méthodes à base d'estimateurs d'état ont obtenu des résultats satisfaisants sur des fours à induction [Christer *et al.*, 1995], des moteurs continus [Yang, 2002] ou des boîtes de vitesse [Swanson, 2001] (Figure 35).

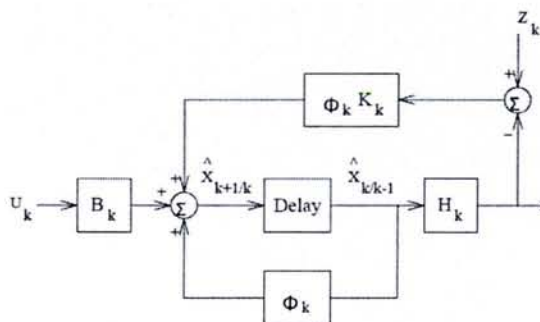


Figure 34 - Schéma de principe d'un filtre de Kalman [Yang, 2002]

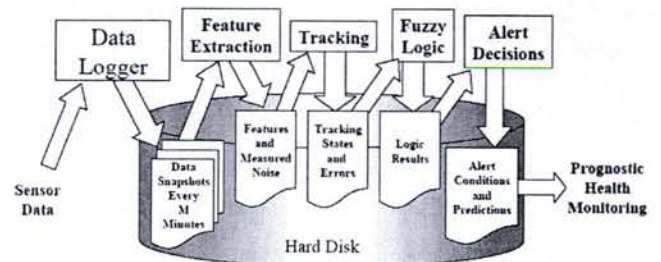


Figure 35 - Procédure d'exécution d'un algorithme de pronostic [Swanson, 2001]

3.2.3. Le pronostic basé sur l'expérience

Lorsqu'il est trop difficile d'élaborer un modèle physique et qu'aucun dispositif de suivi de l'état de dégradation n'est opérationnel, la seule alternative de pronostic consiste à mettre en œuvre une approche basée sur l'expérience (traduction anglaise : "Experience-based prognostic") [Byington *et al.*, 2002].

3.2.3.1. Concepts

Le concept d'"approche basée sur l'expérience" s'appuie sur la modélisation probabiliste de la dégradation, issue de l'expérience acquise sur le comportement du composant étudié.

La mise en œuvre de ce type d'approche est possible à condition de disposer d'un volume de données de retour d'expérience suffisant ou bien d'avis d'experts pertinents.

Ce type de pronostic est particulièrement bien adapté aux systèmes complexes (impossibles à modéliser physiquement et dont les indicateurs de dégradation sont trop sensibles aux fluctuations de conditions d'utilisations).

3.2.3.2. Théories

Le principe d'une approche de pronostic basée sur l'expérience repose sur l'exploitation d'une fonction de fiabilité $R(t)$ ou d'un processus stochastique de détérioration $\{X_t\}$ dont les paramètres sont déterminés à partir d'expertise ou de données de retour d'expérience.

Dans le premier cas, le système modélisé est, soit dans un état de fonctionnement nominal, soit dans un état défaillant dans lequel il ne remplit plus sa finalité. La démarche de modélisation consiste alors à trouver la loi de probabilité de l'instant de défaillance⁴⁰ qui s'ajuste le mieux aux données disponibles. Ensuite, le pronostic est réalisé en utilisant l'évolution du taux de défaillance $\lambda(t)$ ou de la fonction de fiabilité $R(t)$ jusqu'à l'instant voulu. La durée de vie moyenne d'un composant (*MTTF* : Mean Time To Failure) est donnée par l'équation (9) :

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt \text{ ou } \int_0^{\infty} R(t) \cdot dt \quad (9)$$

avec $f(t)$: densité de probabilité du temps à la défaillance.

Dans le second cas, on considère implicitement que le système se dégrade de manière continue, en passant par des états de marche dégradée. Le processus stochastique $\{X_t, t \in \tau\}$ ⁴¹ [Cocozza-Thivent, 1997] qui modélise la détérioration du système est caractérisé par un espace d'états χ continu ou discret. Comme précédemment, le pronostic est réalisé en utilisant l'évolution du processus $\{X_t\}$ jusqu'à l'instant voulu (§III.4.2).

⁴⁰ Instant de passage de l'état nominal à l'état défaillant.

⁴¹ Souvent t représente le temps mais il peut être de dimension multiple (par exemple, le temps et le nombre de sollicitations). Si τ est à valeurs discrètes, on emploie alors le terme de processus à temps discret, sinon de processus à temps continu.

- pour la période de jeunesse :

$$\beta < 1,$$

- pour la période d'exploitation :

$$\beta \approx 1,$$

- pour la période de vieillesse :

$$\beta > 1.$$

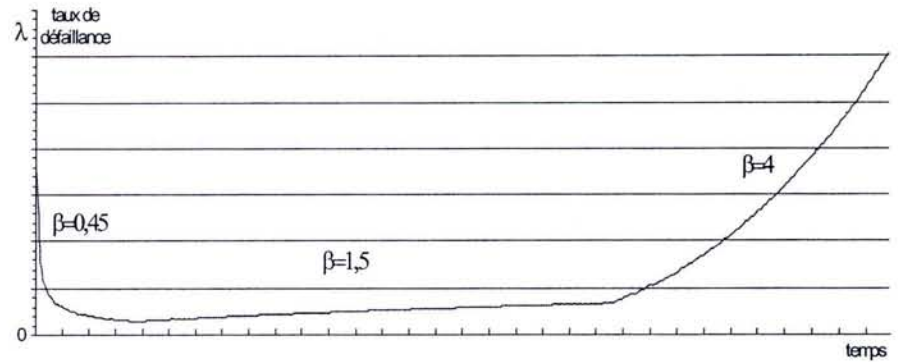


Figure 36 - Valeurs de paramètre β basés sur le modèle de Weibull

3.2.3.3. Modèles

Fonction de fiabilité

La distribution de Weibull est la plus utilisée pour modéliser la fonction de fiabilité $R(t)$ d'un composant ou d'une machine. En effet, elle permet de modéliser l'évolution du taux de défaillance $\lambda(t)$ (10) lors des trois périodes de sa vie : jeunesse, exploitation et vieillesse (Figure 36) :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (10)$$

avec β paramètre de forme, η paramètre d'échelle, γ paramètre de décalage

Toutefois, d'autres distributions sont également utilisées :

- la loi binomiale ou la loi de Poisson pour les systèmes soumis à des défaillances à la sollicitation,
- la loi exponentielle lorsque le taux de défaillance peut être considéré comme constant,
- les lois normale ou log-normale, la loi Gamma...

Dans des conditions d'utilisations réelles, l'évolution de la fiabilité (ou de la détérioration) d'un composant est influencée par un ensemble de paramètres : l'environnement (température, humidité...) ou le mode de fonctionnement du système de production (charges de travail, régimes continus...) [Martorell *et al.*, 1999].

L'utilisation d'un modèle de type PHM (Proportional Hazards Modeling) [Coit *et al.*, 1999] ou ALM (Accelerated life testing) [Finkelstein, 1999] permet de modéliser ce genre de situation en introduisant une ou plusieurs variable(s) exogène(s)⁴² (ou explicatives) dans l'expression de la fiabilité ou du processus de détérioration.

D'un point de vue mathématique, un vecteur des variables exogènes $z(t)$ est introduit dans l'expression $R(t)$ ou $\lambda(t)$. Concrètement, ce vecteur accélère le processus d'usure (modèle ALM) ou augmente le taux de défaillance (modèle PHM) du composant lorsque les conditions d'utilisation se dégradent.

⁴² Une variable exogène exerce une influence sur une autre variable ou alors en explique les variations. Elle est déterminée en dehors du système étudié.

	ALM (Accelerated Life Model)	PHM (Proportional Hazard Model)
Taux de défaillance	$\lambda(t) = \Psi(z)\lambda_0(\Psi(z)t), t \geq 0$	$\lambda(t) = \Psi(z)\lambda_0(t), t \geq 0$
Fiabilité	$R(t) = R_0(\Psi(z)t), t \geq 0$	$R(t) = [R_0(t)]^{\Psi(z)}, t \geq 0$
avec $\Psi(z)$ fonction de $z(t)$, $\Psi(z) = e^{\beta z}$, par exemple.		

[Vlok *et al.*, 2002] utilisent ainsi un modèle Weibull PHM ou modèle de régression Weibull (11) pour modifier "dynamiquement" le taux de défaillance de moteurs à partir d'un vecteur d'usure $z(t)$:

$$\lambda(t, z(t)) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} \exp[\gamma z(t)] \quad (11)$$

Processus stochastiques

Dans la plupart des contributions relatives à l'optimisation de politiques de maintenance conditionnelle, les processus de détériorations sont représentés par des modèles markoviens ou semi-markoviens [Kopnov, 1999], [Bloch-Mercier, 2000], [Grall *et al.*, 2002], [Sommerhalter *et al.*, 2004]...

Processus markovien

Un processus stochastique est markovien si l'évolution future du système ne dépend que de son état présent. Ainsi, la valeur de la variable aléatoire X_t , qui représente l'état du système à l'instant t , dépend uniquement de sa valeur à l'instant précédent $t-1$ (12)

$$P(X_{t+1} | \{X_t, X_{t-1}, \dots, X_0\}) = P(X_{t+1} | X_t) \quad (12)$$

Un processus markovien à espace d'états et à temps discrets⁴³ est complètement défini par :

- Sa matrice de passage $\mathbf{P}_{MC}$ (13), qui contient l'ensemble des paramètres du processus c'est-à-dire les probabilités de transition⁴⁴ $p_{ij}(k) = p(X_k = x_j | X_{k-1} = x_i)$.

$$\mathbf{P}_{MC}(X_k | X_{k-1}) = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1M} \\ p_{21} & & & \dots \\ \dots & & & \dots \\ p_{M1} & p_{11} & \dots & p_{MM} \end{bmatrix} \quad (13)$$

- Son vecteur d'état initial : $\pi_0 = [\pi_0(x_1), \pi_0(x_2) \dots \pi_0(x_M)]$.

Dans un modèle markovien, le temps de séjour passé dans chaque état est exponentiellement (en temps continu) ou géométriquement (en temps discret) distribué. Cela signifie, par exemple, que le taux de défaillance d'un composant à deux états est supposé constant.

⁴³ Autrement dit une Chaîne de Markov.

⁴⁴ Si les probabilités de transition sont invariantes dans le temps, le processus est homogène.

Or, cette hypothèse est inadaptée à la majorité des problèmes réels où des phénomènes physiques comme l'usure, le vieillissement ou la maintenance peuvent modifier, au fur et à mesure du temps, les caractéristiques d'un processus de dégradation ou de défaillance.

Pour lever cette hypothèse, il est nécessaire de généraliser le modèle markovien à des distributions non-exponentielles (non-géométriques), en utilisant, par exemple, un modèle semi-markovien.

Processus semi-markovien

Dans un processus semi-markovien [Limnios, 2002], la transition entre des états distincts correspond à un processus markovien. L'évolution future du système dépend donc, non seulement de son état présent X_n , mais aussi du temps d'occupation T_n ⁴⁵ passé dans cet état.

Un processus semi-markovien est défini de la manière suivante :

1. $\{(X_n, T_n) ; n \in [0, 1, 2 \dots]\}$ est un processus markovien bivarié.
2. χ est l'ensemble des états de X_n ; T_n est l'instant d'arrivée du processus dans l'état n avec $0 = T_0 \leq T_1 \leq \dots \leq T_n \leq T_{n+1} \leq \dots$
3. la fonction de transition du processus est fixée par l'équation (14) :

$$P(X_{n+1} = j, T_{n+1} - T_n < t | X_1 = x_1, T_1 = t_1, \dots, X_n = i, T_n = t_n) = P(X_{n+1} = j, T_{n+1} - T | X_n = i) \quad (14)$$

Ainsi, la probabilité de rester dans un état n'est plus traduite explicitement dans la définition du modèle mais implicitement dans la définition des lois d'occupation des états.

Processus markovien à changements de régime

Lorsqu'un processus de dégradation est influencé par un facteur lié à l'environnement ou bien aux conditions d'utilisation du système, les modèles précédents sont insuffisants. Il faut faire appel à des modèles à changements de régime⁴⁶ qui prennent en compte l'influence de variable(s) exogène(s) sur l'évolution de la dégradation.

Le principe d'un modèle de ce type est de modifier la valeur des paramètres d'évolution de la dégradation en fonction de l'état d'une variable exogène influente (15) :

$$P(X_n | \{X_{n-1}, \dots, X_0\}) = P(X_n | Q_n^T, X_{n-1}) \quad (15)$$

avec $Q_n^T = q_0, q_1, \dots, q_n$ et q_n : état de la variable exogène

3.2.3.4. Méthodes

Estimation des paramètres des modèles

Il existe deux façons d'aborder le problème d'estimation des paramètres caractéristiques d'une fonction de fiabilité $R(t)$ ou d'un processus de détérioration $\{X_t\}$ d'un composant, à partir de données de retour d'expérience : l'approche fréquentielle et l'approche bayésienne.

⁴⁵ Le temps d'occupation est choisi par défaut, mais on peut utiliser un autre processus de comptage.

⁴⁶ Dans la situation markovienne, on parle de "Markov Switching Model" [Hamilton, 1989].

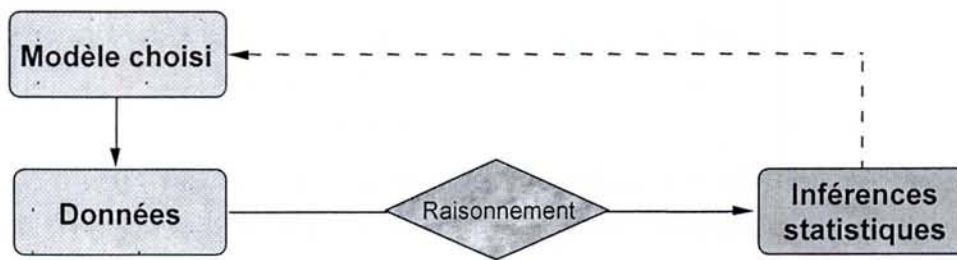


Figure 37 - Inférence fréquentielle

La démarche classique (fréquentielle) d'estimation (Figure 37) se déroule en deux phases :

- sélection d'un modèle adapté à l'échantillon présent,
- estimation des paramètres du modèle par inférences effectuées à partir des données observées.

Cette démarche est utilisée principalement lorsque le volume de données disponibles est important et/ou lorsque les paramètres du modèle que l'on doit estimer sont nombreux.

Dans les autres cas de figure, le recours à une approche bayésienne est recommandé [Suhner, 1994].

Contrairement à l'approche fréquentielle qui ne prend en compte que les données pour élaborer le modèle, la démarche bayésienne incorpore différentes sources d'informations (expertise, retour d'expérience passée, observations actuelles).

Son principe repose, dans un premier temps, sur l'hypothèse d'une distribution de probabilité *a priori*. Ensuite, cette distribution est mise à jour *a posteriori* grâce aux données d'exploitation collectées sur le système réel (Figure 38), et à la remise à jour des paramètres du modèle suivant le théorème de Bayes (16) :

$$p(A / B) = P(A) \cdot \frac{P(B / A)}{P(B)} \quad (16)$$

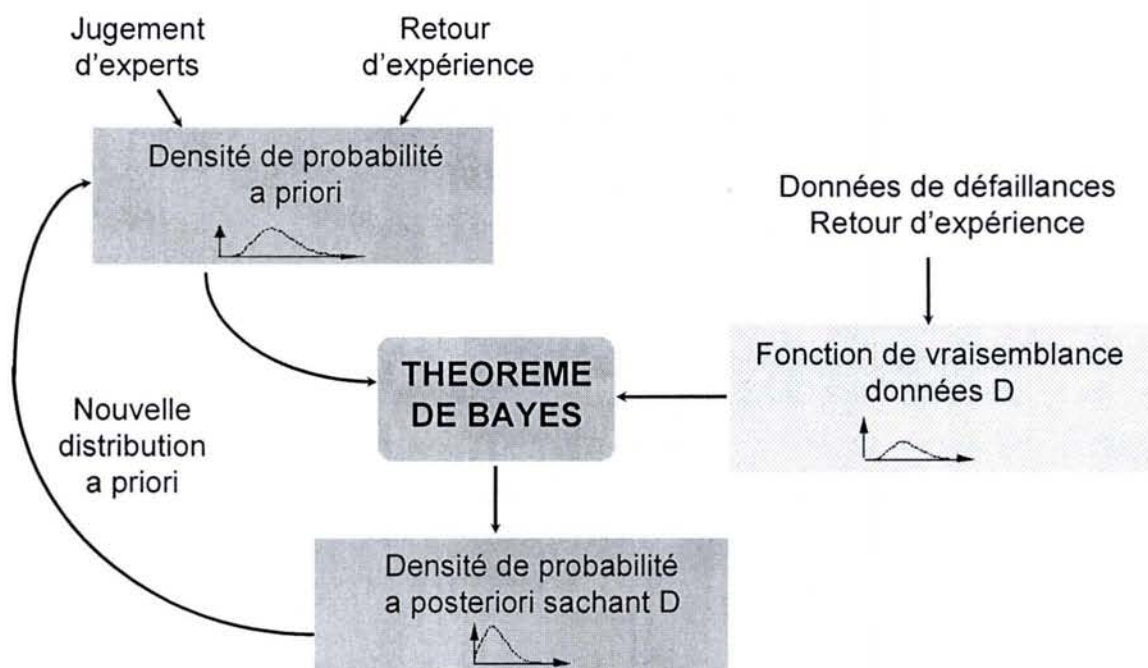


Figure 38 - Principe de la démarche bayésienne en sûreté de fonctionnement

Traitement des processus stochastiques non-markoviens

L'exploitation de processus stochastiques non-markoviens (semi-markoviens, à changement de régime ou autre) complique singulièrement la mise en œuvre du pronostic. Afin de faciliter les calculs et/ou de limiter la durée de leur traitement, il est souvent plus simple de transformer les processus initiaux en processus markoviens "équivalents" plutôt que de les traiter directement.

Deux méthodes principales permettent de remplir cette tâche : la méthode des variables complémentaires et la méthode des états fictifs (ou méthode "phase type"). La seconde semble être la plus puissante et la mieux adaptée à la résolution de systèmes complexes [Almeida *et al.*, 1997].

Le principe de la méthode des états fictifs est d'introduire au sein du processus initial un ensemble d'états, en série (Figure 39) ou en parallèle, exponentiellement distribués [Malhotra *et al.*, 1993]. La distribution résultante est de type "phase", introduite et formalisée en temps discret par [Neuts, 1981].

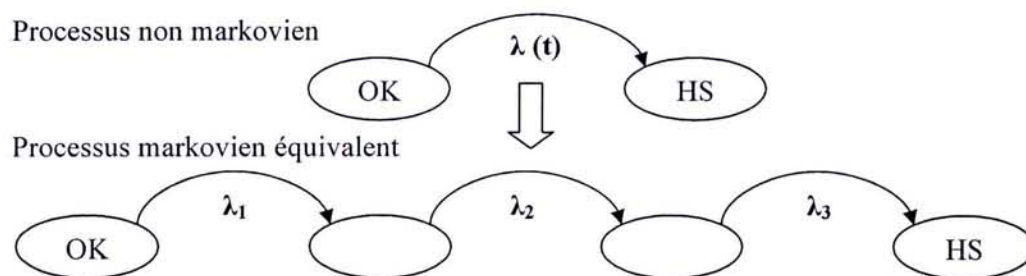


Figure 39 - Méthode des états fictifs (états disposés en série)

Même si elle ne permet pas d'approximer efficacement n'importe quelle distribution [O'Cinneide, 1999], la méthode des états fictifs est couramment utilisée dans la littérature pour approximer des distributions de type log-normal ou Weibull, aussi bien en temps continu [Faddy *et al.*, 2000] qu'en temps discret [Bobbio *et al.*, 2003].

Par ailleurs, en ce qui concerne l'exploitation des processus à changement de régime, [Weber *et al.*, 2004] proposent d'utiliser un MSM (Markov Switching Model) dont le principe est de modifier la valeur des paramètres d'évolution du processus markovien X_n (le régime) en fonction de l'état d'un vecteur de variable Q_n .

3.2.3.5. Méthodologies

La modélisation de la fiabilité d'un composant par distribution statistique (Weibull ou autre) est à l'origine de multiples méthodologies d'optimisation de politiques de maintenance préventive [Barlow *et al.*, 1965], [Dekker, 1996], [Scarf, 1997].

Même si la notion de pronostic n'y est pas présente explicitement, il faut considérer que l'utilisation d'une fonction de fiabilité $R(t)$ pour calculer un $MTTF$ (ou un $MTBF$: Mean Time Between Failures, si le système est réparable) est une forme de pronostic.

Parmi les travaux récents, citons entre autres ceux de :

- [Ramos, 2004] qui optimise la périodicité d'intervention préventive sur des ventilateurs,
- [Van Noortwijk *et al.*, 2004] qui modélisent la durée de vie de ponts en béton pour améliorer leur coût de maintenance et de remplacement,

- [Mijailovis, 2003] qui calcule la disponibilité moyenne d'un disjoncteur à air comprimé soumis à deux modes de défaillances.

3.2.3.6. Outils

Récemment, le développement de méthodologies de pronostic par expérience a donné lieu à la conception de deux logiciels d'optimisation de politiques de maintenance :

- Le logiciel EXAKT⁴⁷ proposé par [Jardine *et al.*, 2004] est un outil d'optimisation de l'instant de remplacement d'équipements critiques (turbine, vanne, moteur...). La méthodologie proposée combine le suivi du taux de défaillance obtenu par le modèle PHM Weibull et la prévision de l'évolution de covariables suivant un processus markovien discret non homogène [Makis *et al.*, 1992]. Un seuil de remplacement préventif est calculé en fonction des coûts de maintenance [Vlok *et al.*, 2002].

Au final, le pronostic (estimation du taux de défaillance instantané) est utilisé par un module d'aide à la décision qui propose à l'utilisateur (Figure 40), la stratégie de maintenance la plus adaptée à la situation courante du système.

- La suite logicielle IBTV d'EDF proposée par [Clarotti *et al.*, 2004] intègre une méthodologie originale de pronostic où la stratégie de maintenance repose sur le déclenchement d'interventions suite à la détection de vieillissement sur un composant (vanne, relais électrique, structure mécanique, par exemple). L'approche est basée sur une démarche bayésienne avec une modélisation *a priori* du comportement du taux de défaillance (composition loi exponentielle / Weibull). De plus, l'efficacité des actions de maintenance est prise en compte suivant l'avis d'expert.

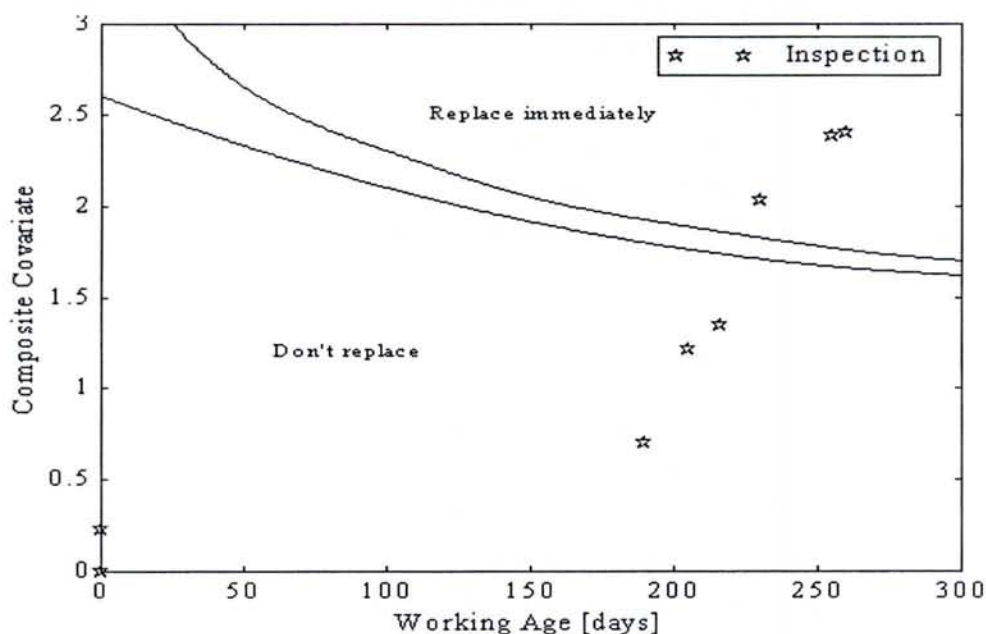


Figure 40 - Politique de remplacement [Vlok *et al.*, 2002]

⁴⁷ EXAKT software : <http://www.mie.utoronto.ca/cbm/>

3.2.4. Synthèse

Nous avons présenté les différentes approches de pronostic mises en œuvre dans le cadre du déploiement d'une stratégie de maintenance prévisionnelle. Chacune d'entre elles possède ses propres points forts et points faibles.

Pronostic basé sur un modèle physique

Le pronostic basé sur un modèle physique suppose qu'une représentation mathématique du mécanisme de dégradation est disponible. Le principe du pronostic est de déterminer le niveau de dégradation courant du système (grâce aux processus de surveillance et de diagnostic) et d'évaluer le temps restant jusqu'à la défaillance en utilisant la courbe d'évolution de la dégradation en fonction de la sollicitation du système.

Le point fort de ce type d'approche est la flexibilité : si une des propriétés du système ou de la dégradation change, le modèle peut être réajusté pour prendre en compte cette modification. De plus, la connaissance de la structure du modèle permet de relier la variation d'indicateurs à une modification d'un paramètre ce qui n'est pas le cas des approches "guidées par les données" [Chelidze *et al.*, 2003].

Toutefois, le développement des modèles est extrêmement coûteux. Il nécessite un niveau de qualification élevé et une expérience certaine de la part des développeurs. De plus, un modèle est développé généralement par mécanisme de dégradation car il est difficile de construire un modèle global pour deux raisons principales :

- la complexité de modélisation des interactions entre les différents mécanismes,
- les difficultés de calcul associées à la résolution d'un système complexe d'équations différentielles (l'explosion des temps de calcul pour la simulation de Monte Carlo).

Pour les mêmes raisons, il est quasiment impossible de généraliser une approche basée sur un modèle physique orientée "composant" à un niveau "système".

Pronostic guidé par les données

Le pronostic guidé par les données est basé sur l'exploitation d'indicateurs de la dégradation, dont l'évolution future est déterminée grâce à un modèle mathématique ou un algorithme de prédiction. Le diagnostic situé en amont conditionne le succès du pronostic par sa capacité à fournir une estimation fiable et précise de l'état de santé courant du système. Le point fort de ce type d'approche est leur capacité d'adaptation à tout type d'application disposant de données suffisantes en quantité et en qualité. Comme elle ne requiert pas la connaissance formelle des mécanismes de dégradation, la mise en œuvre d'une approche "guidée par les données" est relativement simple.

Néanmoins, son efficacité varie en fonction du modèle support du pronostic :

- Les méthodes basées sur un modèle d'analyse de tendance manquent de réactivité par défaut. Pour être performantes, elles doivent impérativement corriger les paramètres des modèles en cas de modification des conditions de fonctionnement du composant.

- Les méthodes basées sur un modèle d'apprentissage automatique sont efficaces à condition que l'échantillon de données contienne l'exhaustivité des scénarios de dégradation. Si un mécanisme nouveau apparaît, le pronostic est aléatoire.

Pronostic basé sur l'expérience

Le pronostic basé sur l'expérience ne requiert pas la connaissance pointue du (des) mécanisme(s) physique(s) de dégradation. Il est relativement simple à mettre en œuvre et peu coûteux même s'il présente un manque de réactivité face au changement de comportement d'un système, quelle qu'en soit la raison.

Pour surmonter cette difficulté, plusieurs solutions sont envisageables, comme l'utilisation d'un modèle fiabiliste évolutif de type ALM ou PHM ou la mise en œuvre d'une démarche bayésienne qui actualise les paramètres de la loi de dégradation à chaque nouvelle information disponible.

Malgré tout, dans le cadre de la maintenance prévisionnelle, les approches basées sur l'expérience présentent deux points faibles :

- les méthodologies se focalisent sur des composants critiques, traités individuellement et donc le développement d'approches orientées "système" est rare,
- les modèles sont souvent limités à une vision (Marche / Défaillance) du composant avec l'absence de la prise en compte d'états dégradés.

Ainsi, il existe fréquemment un décalage entre les modèles (système monocomposant à 2 états) mis au point et la réalité industrielle (système multi-composants multi-états). L'origine de ce décalage provient souvent de l'incapacité des méthodes à effectuer les calculs engendrés par un système complexe.

A l'heure actuelle, la simulation de Monte Carlo est la solution privilégiée pour surmonter cet obstacle [Borgonovo *et al.*, 2000], [Barata *et al.*, 2002], [Crespo Marquez *et al.*, 2005] mais elle-même se retrouve confrontée à un autre problème : l'explosion des temps de simulation.

Remarques communes aux différentes approches

- La vision académique du pronostic est restreinte à son application sur des composants critiques. Les approches sont focalisées sur l'analyse d'un "*composant élémentaire*", la modélisation de systèmes complexes est quasiment inexistante.
- Au travers de l'étude bibliographique réalisée, nous constatons également qu'il existe un écart significatif entre les modèles proposés aux industriels (trop simplifiés) et la réalité des systèmes de production. Les sources du *décalage "modèle / réalité"* sont nombreuses :
 - peu d'intégration de l'incertitude dans la démarche de pronostic,
 - construction de modèles de dégradation peu réalistes,
 - manque de réactivité des modèles face au changement de conditions d'utilisation,
 - absence de modélisation des interventions de maintenance...
- Parallèlement à ce problème, la majorité des travaux n'incorpore pas de boucle de "feed-back" qui permettrait de *vérifier la cohérence* entre le modèle global et le système réel.

- Enfin, la notion de *dégradation* est presque absente du vocabulaire du pronostic. L'objectif de la majorité des travaux est de prévoir la durée de vie moyenne avant la défaillance du système, sans tenir compte d'états dégradés intermédiaires. Or, cette hypothèse supprime du même coup la prise en compte des modes de marche dégradée lors de la modélisation.

L'intégration de ces quatre points dans la démarche de formalisation du processus de pronostic est susceptible d'offrir une première garantie sur la validité du modèle support du pronostic et sur l'adéquation des résultats fournis avec les attentes du SIMP, du MCO et de l'entreprise en général. Cependant, sans exploitation d'une procédure initiale de formalisation des connaissances, la mise en œuvre d'une telle démarche sur un cadre d'application réel est fastidieuse.

4. Conclusion

Elément clé du SIMP, le processus de pronostic a pour mission d'évaluer l'état futur d'un système en fonction de la connaissance de son état actuel (fournie par le processus de surveillance) et des futures interventions de maintenance planifiées ou envisagées (transmises par le processus d'aide à la décision).

Aujourd'hui, l'intégration du processus dans le SIMP, sa modélisation et la formalisation de son principe de construction, aussi bien au niveau du composant qu'au niveau du procédé, constituent des problématiques aussi bien industrielles qu'académiques.

L'étude bibliographique réalisée a mis en avant les points forts et les points faibles des trois principales classes d'approches de pronostic proposées par la communauté scientifique :

- pronostic basé sur un modèle physique,
- pronostic guidé par les données,
- pronostic basé sur l'expérience.

Elle a également permis de constater que les approches répondant globalement aux caractéristiques de complexité, de dynamique des systèmes de production actuels ne sont pas fréquentes, et ceci pour différentes raisons :

- approche réduite la plupart du temps à un niveau "composant élémentaire",
- décalage possible entre la complexité du modèle proposé et le système réel,
- absence régulière de feed-back entre l'évolution du système réel et celle de son modèle,
- prise en compte de la notion de dégradation peu répandue.

Afin de répondre partiellement à ces limites, nous proposons dans le chapitre suivant une méthodologie de modélisation du processus (intégré) de pronostic qui combine les trois types d'approches énoncées précédemment, de manière à profiter simultanément des avantages et à éliminer les inconvénients des approches prises séparément [Luo *et al.*, 2003].

Chapitre III

Proposition d'une méthodologie de modélisation du processus de pronostic

III. Proposition d'une méthodologie de modélisation du processus de pronostic

1. Introduction

La mise en oeuvre d'un système intégré de maintenance prévisionnelle répondant aux besoins industriels identifiés au chapitre I requiert le développement d'un processus intégré de pronostic capable de remplir la mission suivante : *"Après détection de la dégradation d'un composant ou d'un sous-système, le rôle du pronostic est de prédire l'évolution future des performances du système de production en tenant compte d'interventions de maintenance planifiées et éventuellement, de conditions opérationnelles ou environnementales changeantes"* [Muller et al., 2003].

Afin de répondre à cette problématique, nous introduisons dans ce troisième chapitre une méthodologie de modélisation du processus de pronostic basée sur une combinaison des trois types d'approches détaillées au chapitre II, applicable aussi bien au niveau du composant (prédominance de la fiabilité) qu'au niveau du procédé.

L'approche proposée est fondée sur une combinaison de modèles événementiel et probabiliste destinée à bénéficier simultanément de la connaissance *a priori* du comportement du système et du suivi *on-line* de son évolution réelle. Elle vise à développer un processus de pronostic permettant non seulement de propager l'impact d'une dégradation (ou d'une action de maintenance) sur les différents niveaux d'abstraction⁴⁸ du système de production, mais aussi d'établir son effet sur les performances du procédé ou les caractéristiques du produit à délivrer.

La méthodologie proposée implante conjointement le concept de "dégradation" et les principes de "niveau d'abstraction", "pertinence du modèle" et de "cohérence entre modèle et réalité" afin de garantir l'applicabilité de la démarche sur un cas industriel réel. Elle s'appuie sur une approche systémique de modélisation formalisée par un ensemble de mécanismes génériques de construction. Ces mécanismes visent à orienter le concepteur vers une vision "intégrée" du système de production, où l'on étudie la totalité de ses éléments ainsi que leurs interactions et leurs interdépendances.

La mise en œuvre effective du processus de pronostic au sein du SIMP, sur la base d'une intégration horizontale avec les processus de surveillance et d'aide à la décision (Figure 16), est garantie par le fait que l'on conserve une vision "intégrée" du processus tout au long de sa démarche d'élaboration⁴⁹.

⁴⁸ Le niveau d'abstraction fait référence au niveau de granularité du découpage d'un système de production en unités plus petites, le dernier niveau étant le composant élémentaire.

⁴⁹ Les notations utilisées dans ce chapitre pour désigner les différents éléments de la modélisation sont synthétisées en fin de document.

2. Principe de la combinaison d'approches

À l'image du module de pronostic d'OSA/CBM (Figure 41), l'élaboration du processus de pronostic introduit dans nos travaux est basée sur une combinaison des trois types d'approches identifiés au chapitre II, afin de développer des modèles plus réalistes de la dégradation du système intégrant la dynamique de comportement et minimisant l'erreur dans le pronostic de la situation future (écart entre la valeur estimée et la valeur réelle).

La méthodologie de modélisation proposée exploite plus précisément les points clés suivants (Figure 42) :

- **Pronostic basé sur un modèle physique**

- Exploitation de relations causales issues des lois de la physique pour modéliser les interactions entre les entités du système.

- **Pronostic guidé par les données**

- Exploitation d'indicateurs de dégradation ou d'interventions de maintenance délivrés respectivement par les processus de surveillance et d'aide à la décision.
- Mise à jour des paramètres des processus de détérioration par apprentissage, sur des données issues de l'exploitation.

- **Pronostic basé sur l'expérience**

- Formalisation des mécanismes physiques de détérioration des composants par modèles stochastiques (loi de fiabilité, processus markoviens ou non-markoviens) initiés par connaissances *a priori* et jugement d'expert.

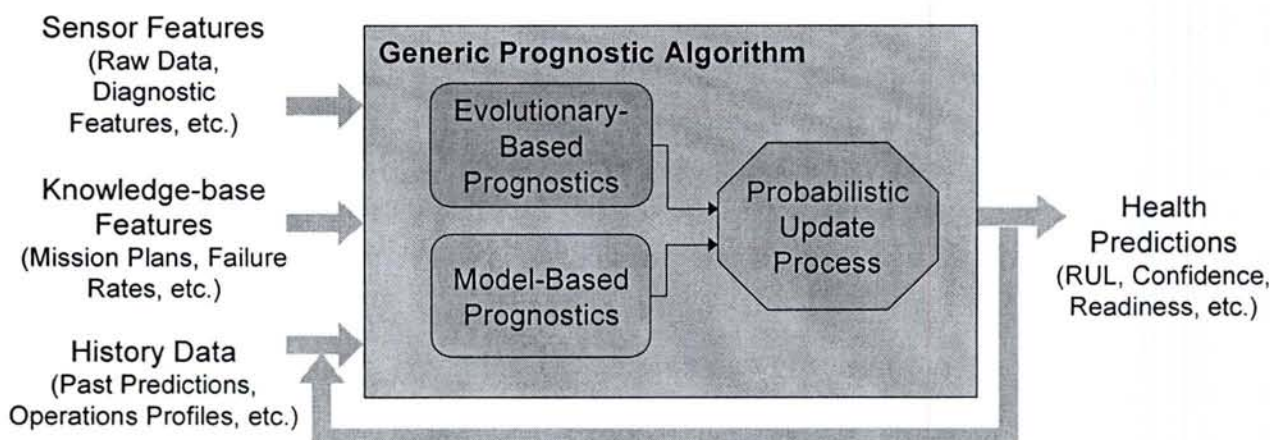


Figure 41 - Les composants génériques du module de pronostic d'OSA/CBM [Lebold *et al.*, 2001]

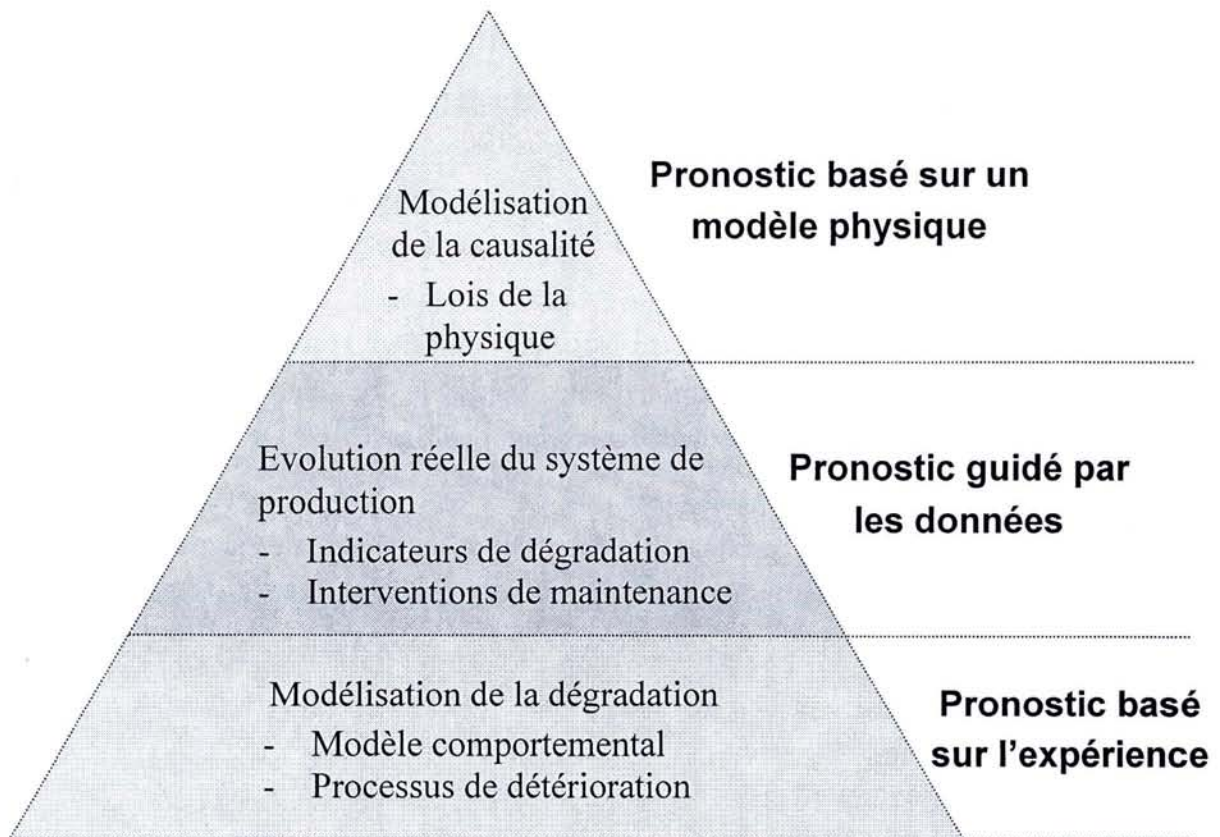


Figure 42 - Positionnement de la démarche par rapport aux approches de pronostic

3. Principe de modélisation du processus de pronostic

La combinaison d'approches est mise en œuvre dans le cadre d'une méthodologie de modélisation du processus de pronostic que nous allons maintenant décrire après avoir présenté au préalable la nature du "pronostic"⁵⁰ que nous souhaitons obtenir.

3.1. Description du pronostic

Conformément à la définition proposée au début du chapitre, le processus de pronostic a pour objectif de fournir une estimation des performances du système de production à l'instant $t + \Delta t$, à partir d'une observation de la situation courante du système à l'instant t et d'une liste (prévisionnelle) d'interventions de maintenance programmées sur l'intervalle $[t, t + \Delta t]$.

⁵⁰ Le terme "pronostic" désigne ici le résultat fourni par le processus de pronostic, exploité au sein du SIMP par le processus d'aide à la décision.

Cette estimation résulte d'une simulation⁵¹ de l'évolution du système sur la période $[t, t+\Delta t]$ réalisée à partir :

- d'un modèle probabiliste composé de variables discrètes représentant l'état des composants et des flux du système de production,
- d'un modèle événementiel intégrant la connaissance de l'état initial de certaines variables du modèle probabiliste (t) et la connaissance du plan de maintenance retenu par le processus d'aide à la décision sur ces variables entre t et $t+\Delta t$.

En fait, le résultat du processus de pronostic appelé "Pronostic" correspond à l'état du modèle probabiliste à l'instant $t+\Delta t$. Il est exprimé sous forme de distributions de probabilités qui caractérisent, sur un cycle de fonctionnement donné (Figure 43) :

- l'état de détérioration des composants C_i ,
- l'état des flux consommés et produits par le système de production, à partir desquels sont déterminés les critères de performances⁵² P_j (par exemple, les caractéristiques du produit à délivrer).

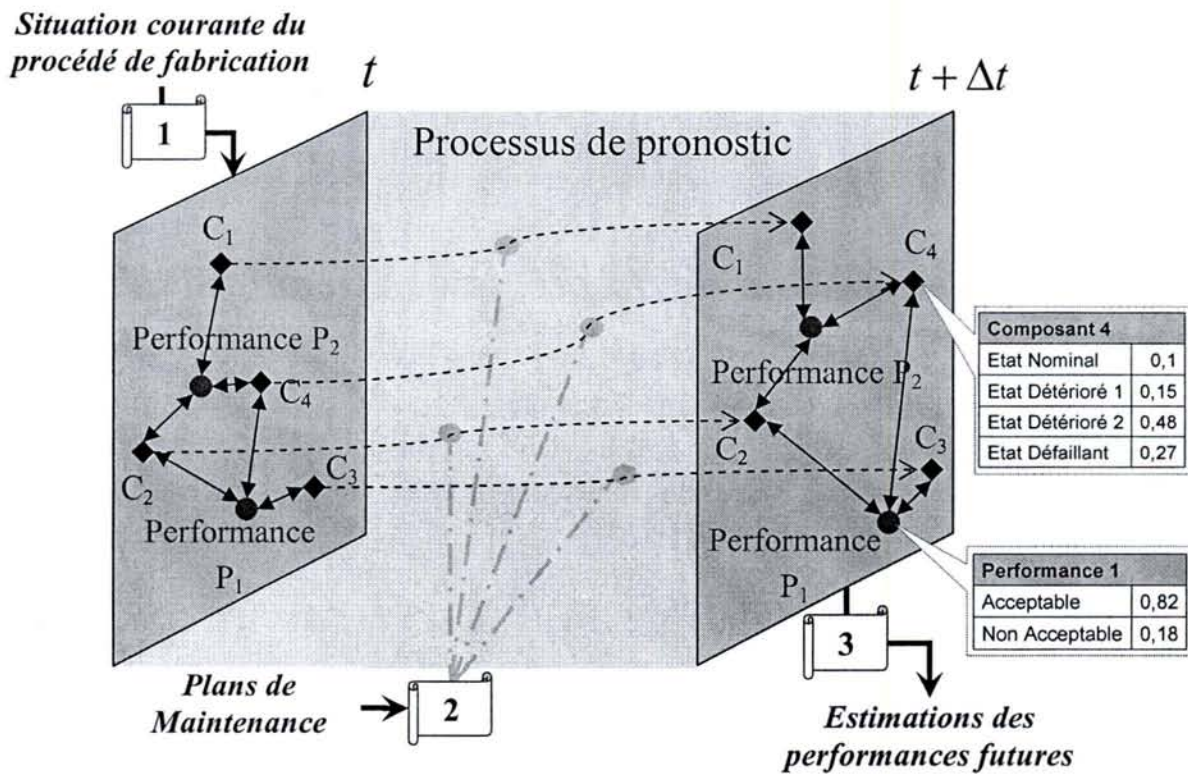


Figure 43 - Descriptif du pronostic attendu

⁵¹ Le terme de simulation est utilisé dans son sens primaire : "Méthode d'étude qui consiste à remplacer tout ou partie d'un dispositif par un modèle mathématique", sans rapport avec les techniques de type Monte Carlo.

⁵² Les critères de performance concernent aussi bien le procédé de fabrication (disponibilité, sécurité...), que le produit (qualité, taux de rebut...).

3.2. Phases de la méthodologie

La méthodologie de modélisation du processus intégré de pronostic définit, dans un premier temps, les mécanismes de construction du modèle de pronostic qui résulte de la combinaison de modèles probabiliste et événementiel (Figure 44) :

- formalisation des connaissances nécessaires à la construction du modèle probabiliste (étape concrétisée par un modèle du fonctionnement et un modèle dynamique),
- élaboration du modèle probabiliste (comportemental) par couplage des deux modèles précédents (utilisation de mécanismes génériques de construction),
- construction du modèle événementiel à partir de connaissances issues des processus de surveillance et d'aide à la décision du SIMP,
- construction du modèle de pronostic par couplage des modèles probabiliste et événementiel.

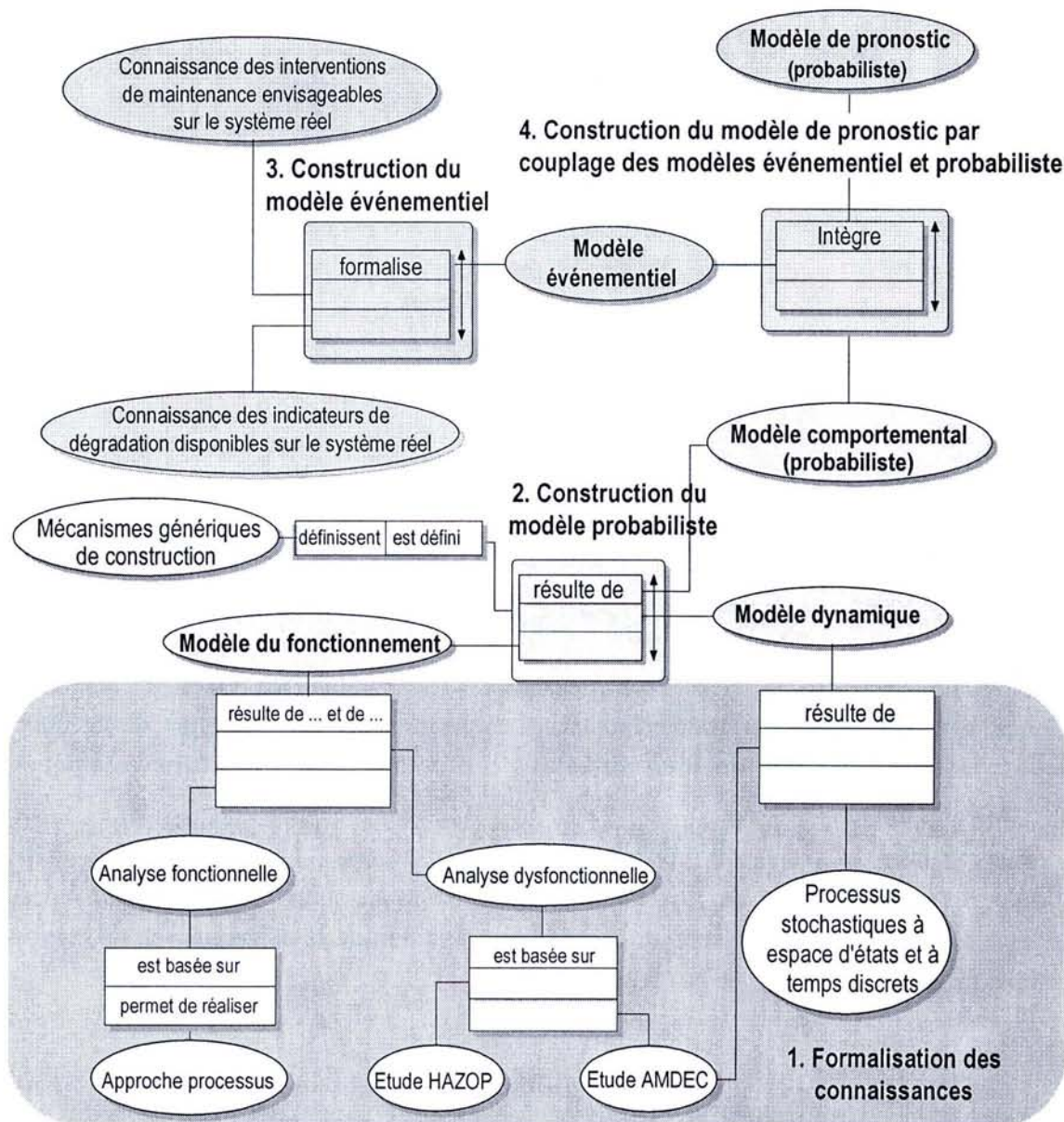


Figure 44 - Méthodologie de modélisation du processus de pronostic (formalisme ORM [Halpin, 1998])

Dans un second temps, la méthodologie définit les principes de mise en œuvre du pronostic dans le cadre du SIMP.

La suite de ce chapitre est donc consacrée à une présentation détaillée de la construction puis de la mise en œuvre du processus de pronostic. Chaque étape est illustrée par l'application de la méthodologie sur le composant critique de la plate-forme d'expérimentation IMS (Intelligent Manufacturing vs Maintenance System) du CRAN : la vanne de régulation (Figure 45).

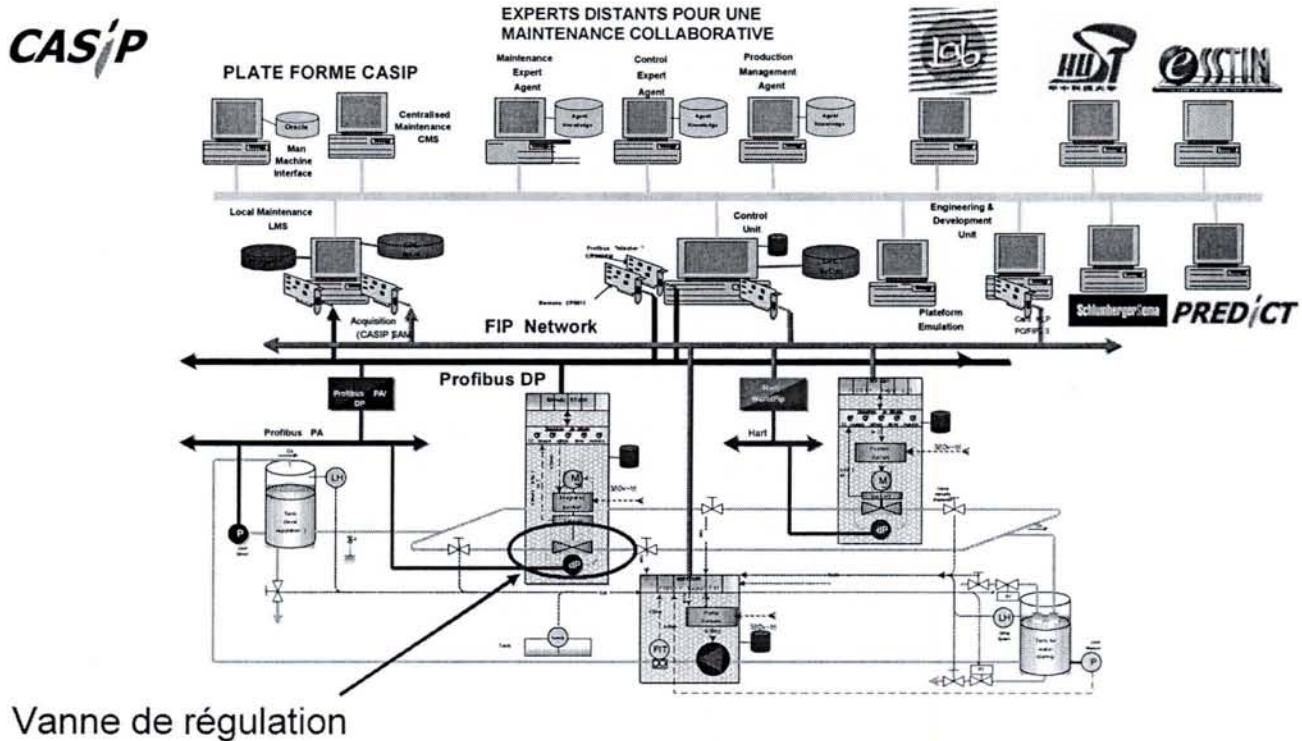


Figure 45 - Plate-forme IMS

4. Formalisation des connaissances nécessaires à l'élaboration du modèle probabiliste

Les sources de connaissance relatives au comportement d'un système de production sont implicites, informelles et surtout très dispersées : expertise, documentations techniques, retour d'expérience...

Afin de simplifier la tâche du concepteur, nous proposons, dans la première étape de la méthodologie, une démarche de formalisation de cette connaissance basée sur un ensemble de méthodes classiques qui garantissent au possible la validation de la connaissance du comportement du système de production (Figure 46) [Blaise, 2000].

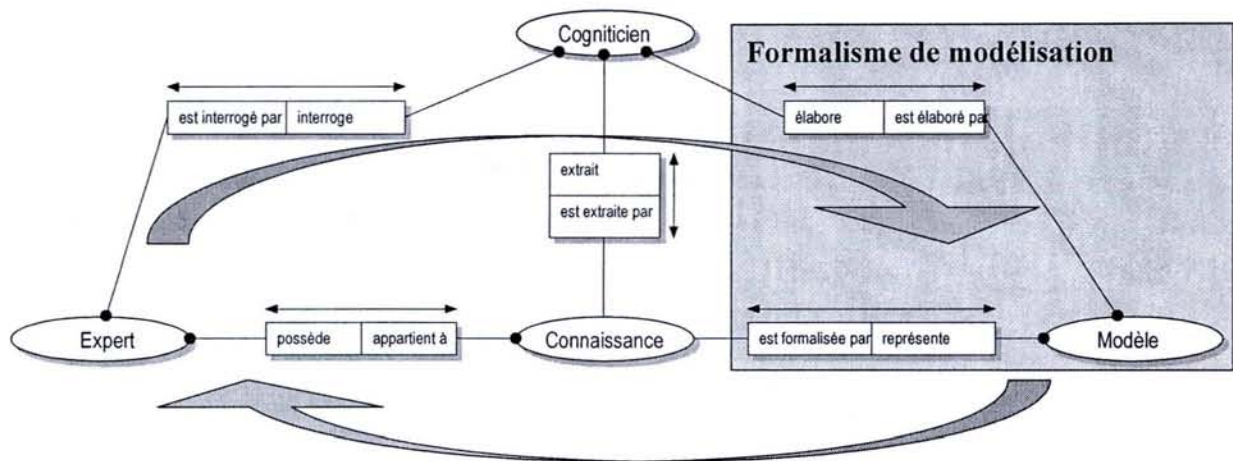


Figure 46 - Modèle NIAM/ORM partiel de la formalisation de la connaissance [Blaise, 2000]

Cette démarche a pour objectif d'extraire puis de formaliser la connaissance relative au comportement du système de production, suivant des points de vue fonctionnel et dynamique (Figure 47).

Le modèle de fonctionnement formalise le comportement "synchronique" du système de production (vision du système à *un instant donné*). Il regroupe l'ensemble des interactions et des interdépendances existant entre les composants C_i et les critères de performance P_j .

En parallèle, le modèle dynamique formalise le comportement "diachronique" du système de production (vision de l'évolution dans le temps du système). Il détermine les lois d'évolution des processus physiques de détérioration affectant les composants C_i .

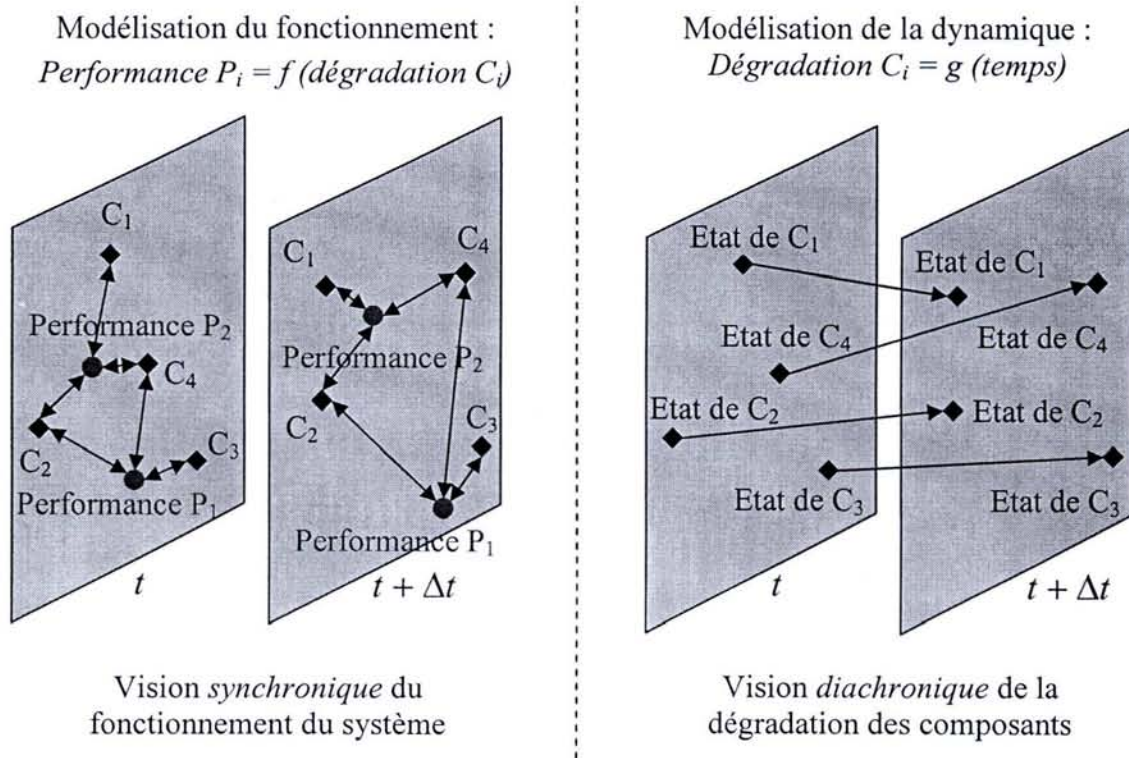
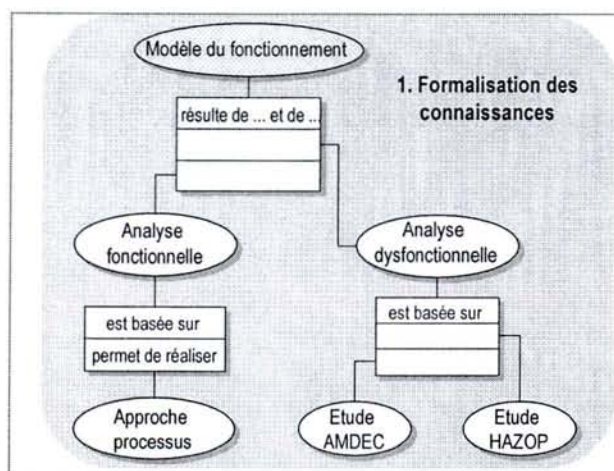


Figure 47 - Visions synchronique et diachronique de l'évolution du système, à partir de [Meinadier, 1998]

4.1. Modélisation du fonctionnement du système de production



La modélisation du fonctionnement du système de production (vision *synchronique*) consiste à formaliser, par des relations causales qualitatives, les interactions entre ses différents composants.

Pour y parvenir, il est nécessaire de réaliser une analyse fonctionnelle puis une analyse dysfonctionnelle du système de production.

L'analyse fonctionnelle, basée sur une décomposition du système de production en processus, a pour objectif d'identifier l'ensemble des composants et des flux du système. Elle se concrétise par l'élaboration d'un **modèle processus**.

Ce modèle sert ensuite de support à la réalisation de l'analyse dysfonctionnelle, dont les objectifs sont d'identifier les états dégradés et défaillants des composants et des flux puis de déterminer les causes et les conséquences de ces états sur le comportement du système de production.

L'analyse dysfonctionnelle est formalisée par des grilles AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) et HAZOP (Hazard and Operability Study) qui intègrent, qualitativement, l'ensemble des relations causales de type : état de dégradation (d'un flux ou d'un composant) → cause → conséquences.

Le modèle du fonctionnement résulte alors de la définition complète des relations causales **Ri** synthétisées dans le Tableau 5.

		F	Flux	X_n	état nominal	
SP	support	Fe	Flux d'entrée	X_d	état dégradé	
R	relation	Fs	Flux de sortie	X_f	état défaillant	
Flux d'entrée	Etat du support	Flux de sortie	Comportement	Relation causale		Type
Fe _n	SP _n	Fs _n	nominal	Fe _n ∧ SP _n → Fs _n		R1
Fe _d	SP _n	Fs _d	dégradé	Fe _d ∧ SP _n → Fs _d		R2
Fe _n	SP _d	Fs _d	dégradé	Fe _n ∧ SP _d → Fs _d		R3
Fe _d	SP _d	Fs _d	dégradé	Fe _d ∧ SP _d → Fs _d		R4
Fe _d	SP _d	Fs _f	défaillant	Fe _d ∧ SP _d → Fs _f		R5
Fe _f	SP _n ou SP _d ou SP _f	Fs _f	défaillant	Fe _f ∧ (SP _n ∨ SP _d ∨ SP _f) → Fs _f		R6
Fe _n or Fe _d	SP _f	Fs _f	défaillant	(Fe _n ∨ Fe _d) ∧ SP _f → Fs _f		R7
Processus de détériorations interagissant			SP1 _d ∨ SP1 _f → (SP2 _d ∨ SP2 _f) ∧ (SP3 _d ∨ SP3 _f)			R8

Tableau 5 - Typologie des relations causales [Muller *et al.*, 2004b]

A l'exception de **R4**, **R5** et **R8**, les relations causales sont formalisées implicitement dans le modèle processus (étude des modes de fonctionnement⁵³ nominaux du système) et dans les grilles AMDEC et HAZOP (études des modes de fonctionnement dégradés et défaillants⁵⁴ du système).

4.1.1. Analyse fonctionnelle du système de production

Selon la norme AFNOR X 50-151 : *"L'analyse fonctionnelle est une démarche qui consiste à rechercher, ordonner, caractériser, hiérarchiser et/ou valoriser les fonctions du produit (système) attendu par l'utilisateur"*. Toutefois, comme nous souhaitons intégrer dans l'analyse l'acteur de la fonction ainsi que les objets consommés et produits, nous désignerons la phase d'analyse fonctionnelle du système sous le terme d'*approche processus*⁵⁵, en référence à la démarche de formalisation suivie en management de la Qualité.

La méthode de décomposition du système de production en "processus" est basée sur une approche de modélisation systémique⁵⁶, intégrant un ensemble de principes introduits notamment dans la "Théorie Générale des Systèmes" [Von Bertalanffy, 1973] et la "Théorie du Système Général" [Lemoigne, 1977].

Concepts utilisés

Le **processus** est défini comme un ensemble d'activités apportant de la valeur, reliées entre elles par des flux d'informations, de matières ou d'énergies pour fournir un produit matériel ou immatériel [Dulmet *et al.*, 2001]. Toute fabrication de produits, toute prestation de service est un processus qui modifie, au fil du temps, la position d'un (ou plusieurs) objet(s) dans un référentiel "Espace-Forme" (Figure 48) pour satisfaire une **finalité**⁵⁷.

Chaque processus consomme et produit au minimum un **flux** d'objets matériels, énergétiques ou informationnels. Le flux est caractérisé par des variables d'états relatives aux propriétés morphologiques, spatiales ou temporelles des objets 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, les variables d'états et les variables de flux sont regroupées sous la dénomination unique d'**attribut** de flux (Figure 49).

⁵³ Le "mode de fonctionnement" du système de production résulte de l'agrégation des comportements de ses composants. Il peut être nominal, dégradé ou défaillant en fonction du degré d'accomplissement de la finalité du système.

⁵⁴ Le système est dans un mode *dégradé* si un de ses processus (au minimum) est dans un état non-nominal alors que sa finalité est toujours réalisée (sinon, le système est dans un mode *défaillant*).

⁵⁵ L'approche processus est définie comme l'identification méthodique des processus utilisés au sein d'un organisme, de leurs interactions, et leur management [AFNOR 2000].

⁵⁶ L'approche systémique n'est qu'une méthodologie de représentation, de modélisation d'un objet actif (lui-même ensemble d'éléments actifs en interaction dynamique) finalisé, physique ou immatériel, en interaction avec ses environnements par l'intermédiaire de flux énergétiques, informationnels ou matériels.

⁵⁷ La finalité est un objet résultant du projet d'un système dans son environnement et pour lequel il a fonctionné et évolué [Von Bertalanffy, 1973].

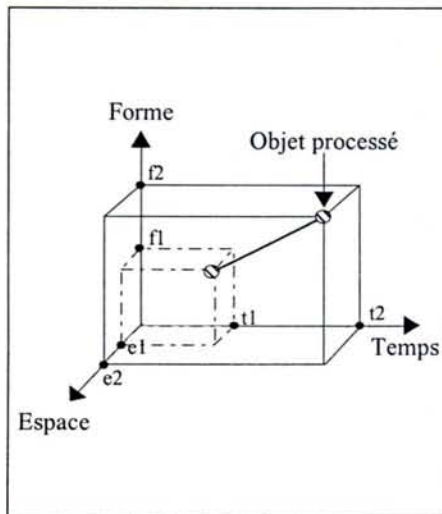


Figure 48 - Référentiel Temps - Espace - Forme [LeMoigne, 1977]

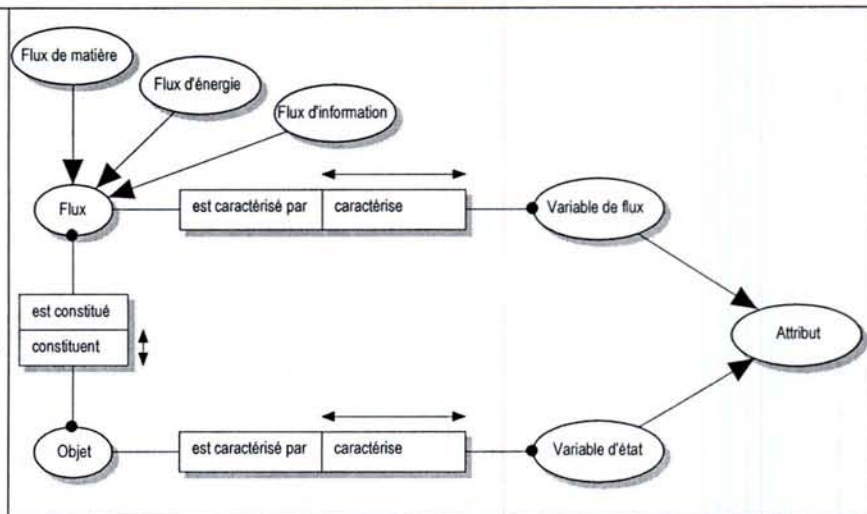


Figure 49 - Formalisation du concept de flux

L'évaluation de la réalisation de la finalité correspond à la **performance** du processus. En règle générale, pour la mesurer, il est nécessaire de spécifier un ou plusieurs indicateur(s). Mais, dans le cadre de l'approche proposée, nous posons l'hypothèse que *la performance d'un processus s'évalue directement sur les attributs des flux qu'il produit.*

Modélisation d'un processus

Les modèles de processus issus de la littérature présentent le point commun de s'intéresser avant toute chose à la finalité du processus et non pas à l'équipement qui supporte la **fonction** ou l'activité. À l'instar de [Lind, 1994], nous formalisons le processus (Figure 50) par un quadruplet {Finalité, Fonction, Support et Comportement} défini de la manière suivante :

- la finalité du processus est sa raison d'être, son but, le service pour lequel il a été créé (Pourquoi ?),
- la fonction correspond à l'action réalisée par le processus sans considération de la finalité et de l'acteur de processus (Quoi ?),
- le support est le responsable de l'exécution de la fonction (Qui ?). Il s'agit d'un acteur matériel (composant élémentaire, groupe de composant, sous-système...) ou humain,
- le comportement décrit la loi de transformation des flux entrants en flux sortants notée $S=F(E)$ sous forme de relations causales qualitatives ou quantitatives (Comment ?).

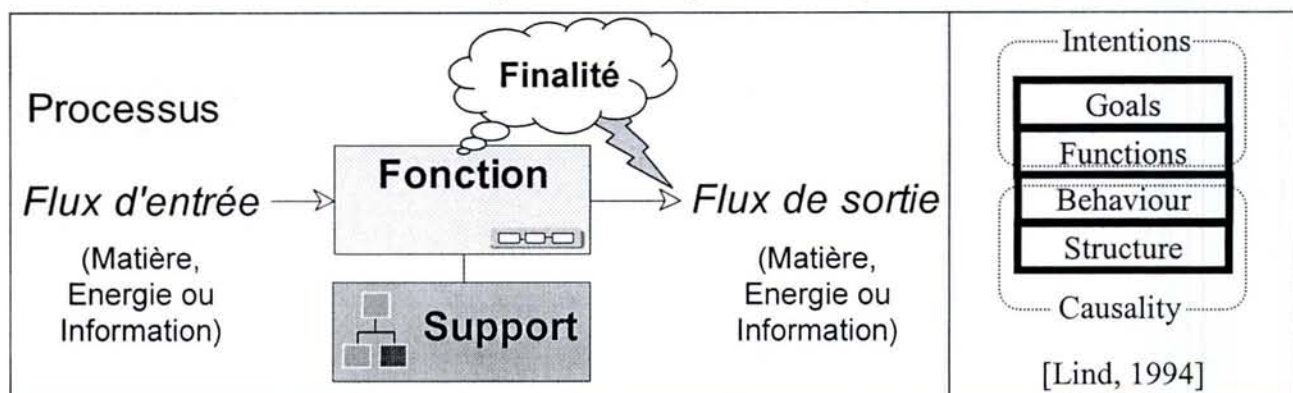


Figure 50 - Proposition de formalisation d'un processus

Proposition d'une méthode de décomposition en processus

Le principe de la méthode de modélisation est simple : recenser l'exhaustivité des processus concurrents et communicants mis en œuvre par le système de production et identifier l'ensemble des flux de matière, d'énergie et d'information échangés par ces mêmes processus.

En ce sens, la démarche de modélisation par processus proposée comprend trois étapes, exécutables dans n'importe quel ordre :

- décomposition du procédé physique en processus identifiés suivant leur fonction et leur finalité,
- définition du support de réalisation,
- définition des flux échangés par les processus.

La décomposition analytique itérative des processus principaux en sous-processus transformateurs de flux s'effectue suivant une démarche ascendante, descendante ou mixte.

Remarque : c'est elle qui permet de relier les composants aux performances du procédé.

En phase de conception ou dans le cadre d'un système existant assez simple, l'analyse est généralement menée de manière descendante. La décomposition part de la finalité du système global pour atteindre les processus de niveau élémentaire. Par contre, lorsque l'installation industrielle est complexe et déjà existante, il est souvent plus simple de suivre une démarche ascendante, en commençant par déterminer les processus réalisés par chaque composant élémentaire, puis en les agrégeant jusqu'à l'obtention de la finalité du système complet.

Les deux autres étapes ne posent pas de difficulté particulière.

En général, le système de production est déjà divisé hiérarchiquement en sous-systèmes par l'entreprise et il n'y a donc pas de problème pour définir les supports de réalisation des processus non élémentaires.

Enfin, l'identification des flux de matière, d'énergie et d'information échangés dans le système n'inclut pas la spécification de leurs attributs de Temps, d'Espace et de Forme. Cette opération sera réalisée lors de la modélisation dynamique du système.

Outil / Langage de modélisation sélectionné

L'utilisation grandissante d'approches orientées objet a engendré un essor considérable de l'utilisation du langage UML (Unified Modelling Language) [Vernadat, 2001]. Malheureusement, UML n'intègre pas le concept de processus, ce qui signifie qu'il est nécessaire de modifier le métamodèle d'un des neuf diagrammes préconçus pour mettre en œuvre une approche processus [Morley, 2001].

C'est pourquoi nous avons privilégié un outil "métier" axé sur la modélisation des processus : **MEGA process**. À l'origine, MEGA Process est un logiciel édité par MEGA⁵⁸ International pour mettre en place une démarche d'amélioration ou de reconception des processus de l'entreprise.

⁵⁸ <http://www.mega.com>

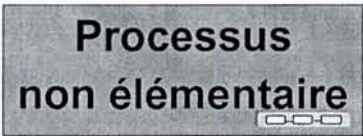
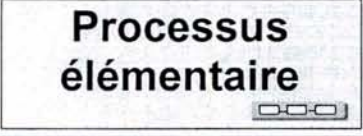
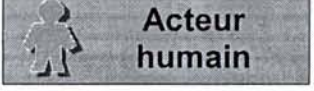
 Processus non élémentaire	<i>Processus non élémentaire (décomposé)</i>
 Processus élémentaire	<i>Processus élémentaire⁵⁹</i>
<i>Flux lié au produit</i> —————>	<i>Flux lié au produit</i>
<i>Flux indirect</i> —————>	<i>Autre type de flux</i>
 Acteur matériel	<i>Acteur matériel</i>
 Acteur humain	<i>Acteur humain</i>

Figure 51 - Eléments du formalisme graphique mis en œuvre dans l'approche processus proposée

Nous avons sélectionné cet outil pour deux raisons :

- Il supporte la création de diagrammes de processus multi niveaux, ce qui permet de représenter le système suivant différents niveaux d'abstraction⁶⁰.
- Il accorde au modélisateur la liberté de restreindre ou d'étendre à son gré le champ des concepts qu'il veut voir figurer sur un diagramme de processus. Nous conservons dans l'approche processus uniquement les objets présents sur la Figure 51.

4.1.2. Analyse dysfonctionnelle du système de production

Le système de production est dans un mode de fonctionnement dégradé ou défaillant en cas de présence de déviations de flux et/ou de détériorations de supports de processus.

- La **dévi**ation de flux est liée à la variation qualitative ou quantitative d'un attribut de flux par rapport à sa valeur nominale.
- La **dété**rioration d'un support est relative à l'apparition d'un mécanisme physique de détérioration⁶¹.

L'une et l'autre provoquent par la suite, l'apparition d'un **mode de dégradation** ou de **défaillance**⁶² du processus.

⁵⁹ Le processus élémentaire est équivalent à la notion d'activité, utilisée couramment en analyse fonctionnelle.

⁶⁰ Le niveau d'abstraction correspond au degré de décomposition (granularité) d'un système de production.

⁶¹ Les processus de détérioration sont provoqués par l'accumulation d'usure (abrasion, corrosion, érosion, vieillissement...) ou bien par occurrence répétée de chocs sur le système.

⁶² Le mode de dégradation (défaillance) est l'effet par lequel une dégradation (défaillance) est observée. Selon la situation, la dégradation occasionne l'apparition d'un symptôme au niveau du composant (ex : vibrations sur un moteur), ou alors elle engendre la déviation d'un (ou plusieurs) flux sortant(s) du processus.

Cette dégradation se propage au reste du système par l'intermédiaire des flux échangés entre les processus, en accord avec le principe de **causalité** :

- La cause potentielle de la dégradation d'un processus est la déviation d'un attribut de flux entrant ou bien la détérioration de son support de réalisation.
- Inversement, l'effet potentiel de la dégradation d'un processus est la déviation d'un attribut de ses flux sortants.

Remarque : c'est grâce à ce principe de causalité que la mise en œuvre du pronostic à différents niveaux d'abstraction du système est possible.

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

- l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité),
- l'HAZOP (Hazard and Operability Study).

Étude AMDEC

La méthode AMDEC consiste à identifier de façon inductive les risques de dysfonctionnement des systèmes, à en rechercher les origines et les conséquences, afin de proposer des actions correctives [AFNOR X60-010].

L'analyse débute par le recensement des modes de dégradation de chaque support de processus (Tableau 6) considérés comme vraisemblables. Ensuite, il faut déterminer les processus de détérioration responsables (les causes) des modes de dégradation ainsi que les déviations de flux résultantes (les conséquences).

Dégradations génériques				Déviations génériques	
1	Fonctionnement prématuré	19	Fonctionnement irrégulier	PAS DE	Négation complète
2	Ne fonctionne pas au moment prévu	20	Indication erronée		
3	Ne s'arrête pas au moment prévu	21	Écoulement réduit		
4	Défaillance en fonctionnement	22	Mise en marche erronée	PLUS DE	Augmentation quantitative
5	Défaillance structurelle (rupture)	23	Ne s'arrête pas		
6	Blocage physique ou coincement	24	Ne démarre pas		
7	Vibrations	25	Ne commute pas	MOINS DE	Diminution quantitative
8	Ne reste pas en position	26	Fonctionnement après le délai prévu		
9	Ne s'ouvre pas	27	Entrée erronée (augmentation)		
10	Ne se ferme pas	28	Entrée erronée (diminution)	PARTIE DE	Diminution qualitative
11	Défaillance en position ouverte	29	Sortie erronée (augmentation)		
12	Défaillance en position fermée	30	Sortie erronée (diminution)		
13	Fuite interne	31	Perte de l'entrée	PARTIE SUPPLEMENTAIRE	Augmentation qualitative
14	Fuite externe	32	Perte de la sortie		
15	Dépasse la limite supérieure tolérée	33	Court-circuit (électrique)		
16	Est en dessous de la limite inférieure tolérée	34	Circuit ouvert (électrique)	AUTRE QUE	Substitution complète
17	Fonctionnement intempestif	35	Fuite (électrique)		
18	Fonctionnement intermittent	36	Autres conditions de défaillance exceptionnelles suivant les caractéristiques du système, les conditions de fonctionnement et les contraintes opérationnelles		
				INVERSE	Contraire logique

Tableau 6 - Dégradations et déviations génériques issus de la norme [AFNOR X60-010]

Etude HAZOP

L'HAZOP est une méthode inductive issue du domaine de la commande des procédés continus initialement destinée à évaluer la robustesse d'une commande [Lawley, 1974]. Elle s'intéresse aux flux de Matière, d'Energie et d'Information échangés entre les processus, alors que l'AMDEC s'intéresse à leurs supports. Ainsi, les deux méthodes sont complémentaires. Dans le cadre de la méthodologie proposée, l'analyse se réduit⁶³ à un inventaire des déviations possibles (Tableau 6) des attributs d'Espace, de Temps et de Forme des flux produits par chaque processus, suivi de l'analyse de leurs causes.

Outil / Langage de modélisation sélectionné

La mise en œuvre des études AMDEC et HAZOP est supportée par la suite logicielle CASIP⁶⁴ (Computer Aided Safety and Industrial Productivity) qui permet de réaliser les deux analyses à partir d'une décomposition fonctionnelle du système de production et d'objets de modélisation (équipements, déviations, dégradations, champs...) communs [Léger, 2003].

La cohérence des deux analyses est assurée par le partage d'un système d'information unique.

L'interface graphique du module AMDEC se présente sous la forme d'un tableau dans lequel les colonnes Dégradation - Cause - Conséquence sont associées respectivement aux concepts de modélisation : Mode de dégradation - Processus de détérioration - Déviation de flux.

De même, l'interface graphique du module HAZOP se présente sous la forme d'un tableau dont les colonnes Propriété - Déviation - Cause identifient les relations causales de type : Attribut de flux sortant - Type de déviation - Déviation d'un attribut de flux entrant.

4.1.3. Modélisation causale du fonctionnement

Le modèle du fonctionnement résulte de la formalisation des relations causales *Ri* entre les flux entrants, les flux sortants et le support de chaque processus (Tableau 5). Il s'agit, dans un premier temps, de formaliser les modes de fonctionnement nominaux du système de production (relations *R1*) puis, dans un deuxième temps, de formaliser les modes de fonctionnement dégradés ou défaillants (relations *R2* à *R8*).

4.1.3.1. Modélisation du fonctionnement nominal du système

L'étude du fonctionnement nominal du système de production est déduite du modèle processus. Toutefois, il n'est pas possible de transformer "directement" le modèle processus en relations causales à cause du risque de non-respect simultané des principes de causalité⁶⁵ et de vision synchronique (illustration dans l'exemple suivant).

⁶³ En effet, les causes de déviations des attributs de flux entrants ont déjà été traitées dans l'étude AMDEC.

⁶⁴ Suite logicielle CASIP développée par la société PREDICT S.A. : <http://www.predict.fr>

⁶⁵ Principe de causalité : {si $A(t_i) \rightarrow B(t_i)$, alors $A \neq B \forall$ l'instant t_i choisi}

Ce problème survient lorsqu'il existe des boucles de rétroaction dans le fonctionnement du système. Chaque boucle de rétroaction engendre en effet la création d'un cycle dans le modèle processus, incompatible avec le respect simultané des principes de causalité et de vision synchronique.

Pour surmonter le problème, nous avons décidé d'ajouter un attribut générique "cycle de production" sur chaque flux. Ainsi, la procédure de conversion du modèle processus permettant de formaliser l'ensemble des relations **R1** du Tableau 5 se déroule en trois étapes :

- Élimination des cycles présents dans le modèle processus, grâce à la spécification de l'état de la variable "cycle de production" associée à chaque flux.
- Identification des états nominaux des flux et des supports.
- Dédution de l'ensemble des relations causales de type **R1** : $Fe_n \wedge SP_n \rightarrow Fs_n$.

Exemple d'illustration

Le système de la Figure 52a, composé de quatre processus, a pour finalité de transformer de la matière brute en un produit fini.

La conversion "directe" du modèle de la Figure 52 donne les équations suivantes :

$$\text{Matière}_n \wedge \text{Action}_n \wedge \text{Opérer}_n \rightarrow \text{Produit}_n \quad (17)$$

$$\text{Consigne}_n \wedge \text{Acter}_n \rightarrow \text{Action}_n \quad (18)$$

$$\text{Etat}_n \wedge \text{Contrôler}_n \rightarrow \text{Consigne}_n \quad (19)$$

$$\text{Produit}_n \wedge \text{Mesurer}_n \rightarrow \text{Etat}_n \quad (20)$$

En agrégeant ces équations, on aboutit à l'expression suivante :

$$\begin{aligned} &\text{Produit}_n \wedge \text{Mesurer}_n \rightarrow \text{Etat}_n \wedge \text{Contrôler}_n \rightarrow \\ &\text{Consigne}_n \wedge \text{Acter}_n \rightarrow \text{Action}_n \wedge \text{Opérer}_n \wedge \text{Matière}_n \rightarrow \text{Produit}_n \end{aligned} \quad (21)$$

Si l'on introduit la dimension synchronique dans l'équation (21), c'est-à-dire la vision du système sur un cycle de production C , on obtient l'équation (22), que l'on peut mettre sous la forme simplifiée (23) :

$$\begin{aligned} &\text{Produit}_n(C) \wedge \text{Mesurer}_n(C) \rightarrow \text{Etat}_n(C) \wedge \text{Contrôler}_n(C) \rightarrow \\ &\text{Consigne}_n(C) \wedge \text{Acter}_n(C) \rightarrow \text{Action}_n(C) \wedge \text{Opérer}_n(C) \wedge \text{Matière}_n(C) \rightarrow \\ &\text{Produit}_n(C) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\text{Produit}_n(C) \wedge \text{Mesurer}_n(C) \rightarrow \dots \rightarrow \text{Produit}_n(C) \quad (23)$$

On s'aperçoit alors que le principe de causalité n'est plus respecté dans l'équation (23).

Après spécification de l'état de l'attribut "cycle de production"⁶⁶ sur chacun des flux (Figure 52b), on distingue deux flux différents *Produit (cycle courant)* et *Produit (cycle précédent)*. Le principe de causalité est alors respecté (24) :

$$\text{Produit}_n(\text{Cycle précédent}) \wedge \text{Mesurer}_n(\text{Cycle courant}) \rightarrow \dots \rightarrow \text{Produit}_n(\text{Cycle courant}) \quad (24)$$

⁶⁶ L'attribut "cycle de production" prend la valeur *cycle courant* par défaut, ou alors la valeur *cycle précédent* dans le cas d'un flux consommé par un processus de mesure.

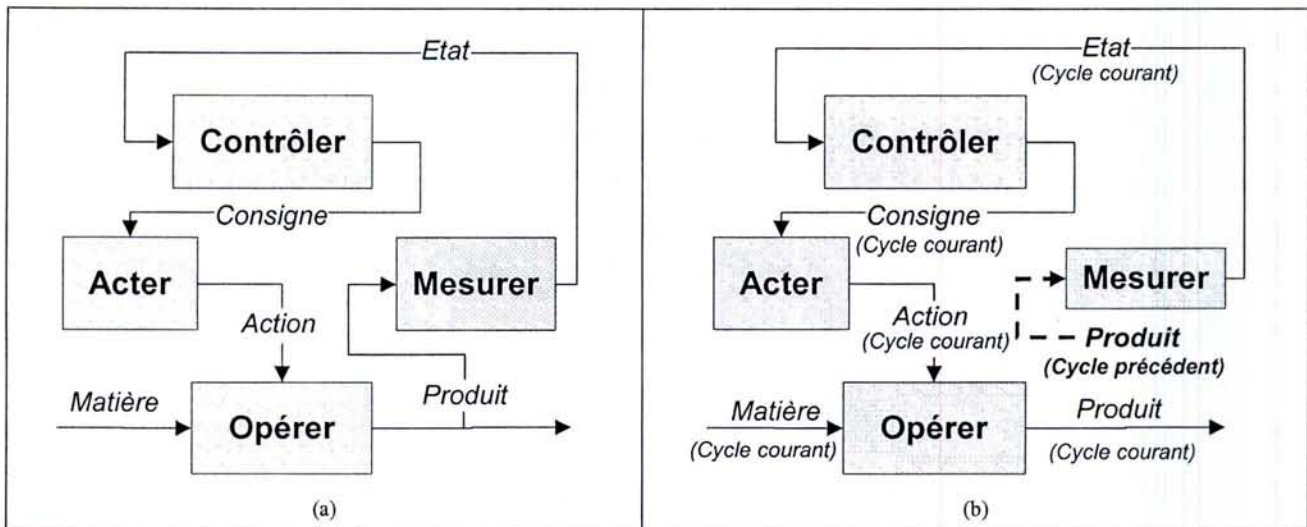


Figure 52 - Intégration de la spécification du cycle sur une boucle de contrôle simple

Interprétation : le non-respect du principe de causalité vient du flux *Produit*, considéré à la fois flux de sortie du processus *Opérer* et flux d'entrée du processus *Mesurer*. Sur un cycle de production donné (vision synchronique), le *Produit* qui résulte de la transformation *Opérer* n'est pas le même flux que le *Produit* qui a été consommé au préalable par le processus *Mesurer* pour établir la *Consigne*. En effet, le premier représente le produit "courant" à l'instant de la modélisation, alors que le second est l'image du produit du cycle de production "précédent" utilisé pour établir la consigne actuelle. Par conséquent, il est nécessaire de les différencier.

4.1.3.2. Modélisation du fonctionnement non nominal du système

L'étude du fonctionnement non nominal du système de production consiste à extraire des grilles AMDEC et HAZOP les relations **R2** à **R8**.

L'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité) permet de formaliser l'ensemble des relations **R3** et **R7** (Figure 53) alors que l'HAZOP (Hazard and Operability Study) permet de formaliser l'ensemble des relations **R2** et **R6** (Figure 54).

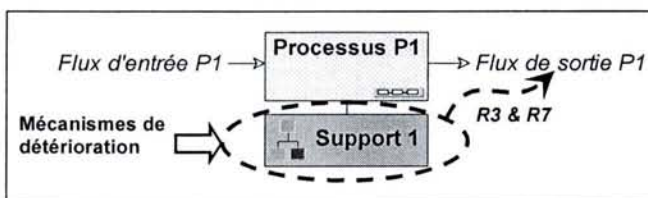


Figure 53 - Positionnement de l'AMDEC par rapport au modèle processus

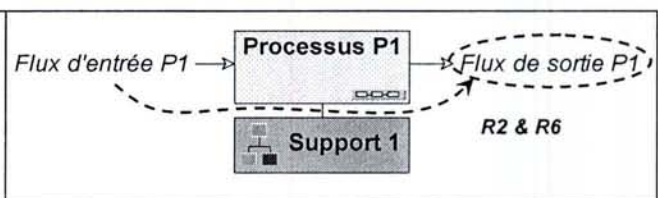


Figure 54 - Positionnement de l'HAZOP par rapport au modèle processus

Les analyses AMDEC et HAZOP étudient les modes de dégradation des supports ou les déviations de flux, individuellement et indépendamment les uns des autres. Ainsi, elles ne permettent pas de formaliser les relations **R4** et **R5** qui combinent la présence simultanée d'une déviation de flux entrant et d'une détérioration du support de réalisation du processus (Figure 55). De même, les relations de type **R8** (dépendance entre des processus de détérioration) ne sont abordées ni dans l'une, ni dans l'autre méthode (Figure 56).

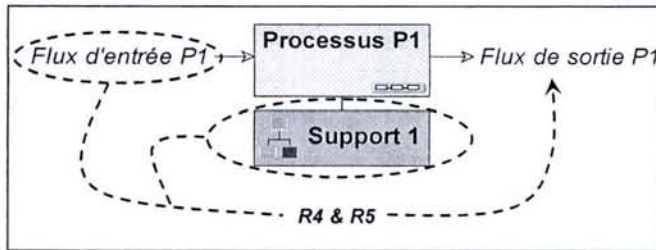


Figure 55 - Déviation de flux et détérioration de support simultanées

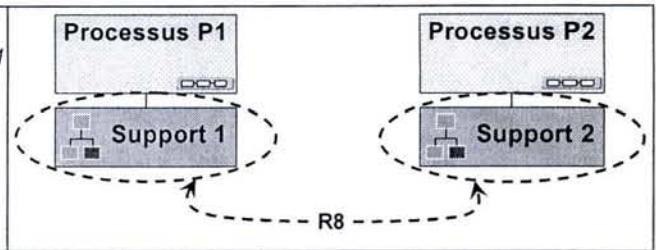


Figure 56 - Dépendance entre processus de détérioration de supports différents

4.1.3.3. Conclusion

Le modèle du fonctionnement du système de production est déduit de l'analyse fonctionnelle et des analyses dysfonctionnelles réalisées dans l'étape de formalisation des connaissances. En effet, le modèle du fonctionnement résulte de la traduction en équations causales :

- des relations **R1** formalisées implicitement dans le modèle processus intégrant la spécification de l'état de la variable "cycle de production" associée à chaque flux,
- des relations **R3** et **R7** formalisées par la grille AMDEC,
- des relations **R2** et **R6** formalisées par la grille HAZOP.

Les relations de type **R4**, **R5** et **R8** ne sont pas intégrées dans ce modèle car elles sont directement formalisées sous forme quantitative dans la suite de la méthodologie :

- **R4** et **R5** lors de la création du modèle probabiliste (§III.5.3.4),
- **R8** lors de l'étude de la dépendance stochastique des processus de détérioration (§III.4.2).

4.1.4. Application : élaboration du modèle du fonctionnement de la vanne de régulation

La vanne de régulation de la plate-forme IMS [Muller *et al.*, 2004a] est le support d'un processus *Ajuster la différence de pression amont/aval en modifiant la position de l'obturateur de la vanne* décomposé en quatre sous-processus (Figure 57).

Etude AMDEC

L'analyse AMDEC du sous-processus *Opérer la pression différentielle amont/aval* supporté par le corps de vanne fait apparaître qu'un seul mode de dégradation "Perte d'étanchéité en position fermée" possède un impact significatif sur la performance du processus global. Ce mode de dégradation est causé par un mécanisme d'érosion de l'obturateur de la vanne (Figure 58). Il engendre la déviation PLUS de "pression du flux d'eau aval".



- **Finalité** : obtenir une différence de pression amont/aval satisfaisante
- **Fonction** : ajuster la différence de pression amont/aval en modifiant la position de l'obturateur de la vanne
- **Support** : vanne de régulation
- **Comportement** : décrit par l'ensemble des relations causales entre les attributs des flux entrants (flux d'eau amont, consigne, énergies d'alimentation) et les attributs des flux sortants du processus (flux d'eau aval, compte rendu)

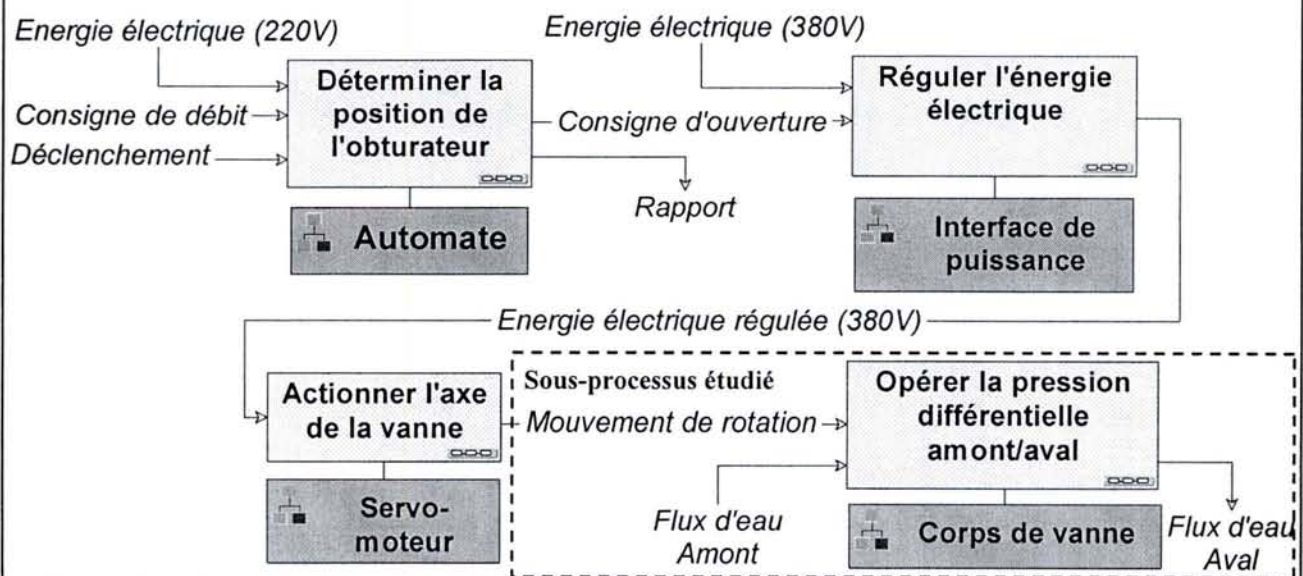
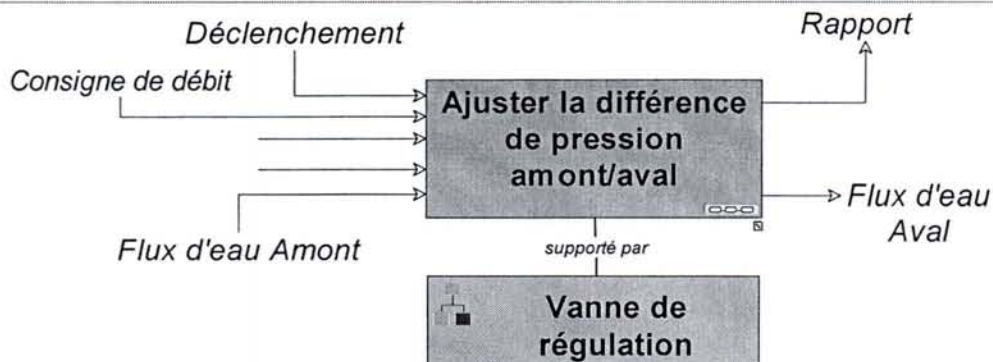


Figure 57 - Modélisation du processus supporté par la vanne de régulation [Muller et al., 2004a]

Module AMDEC de la Suite Logicielle Globale CASIP (C:\Program Files\Casip\Data\IMS.cas)			
Grille AMDEC			
	Dégradation / Défaillance	Cause	Conséquence
Vanne de régulation	Perte d'étanchéité en position fermée	Erosion de l'obturateur	PLUS de Pression de Flux d'eau aval

Figure 58 - Analyse AMDEC du sous-processus *Opérer la pression différentielle amont/aval*

Module HAZOP de la Suite Logicielle Globale CASIP (C:\Program Files\Casip\Data\IMS.cas)			
Grille HAZOP			
	Propriété	Déviations	Cause
Débit	Débit	MOINS	MOINS de Débit de Flux d'eau amont
		PAS	PAS de Débit de Flux d'eau amont
		PLUS	PLUS de Débit de Flux d'eau amont
Pression	Pression	MOINS	MOINS de Pression de Flux d'eau amont
		PAS	PAS de Vitesse angulaire de Mouvement de rotation
		PLUS	PLUS de Pression de Flux d'eau amont
		MOINS	MOINS de Position courante de Mouvement de rotation
		PLUS	PLUS de Position courante de Mouvement de rotation

Figure 59 - Analyse HAZOP du sous-processus *Opérer la pression différentielle amont/aval*

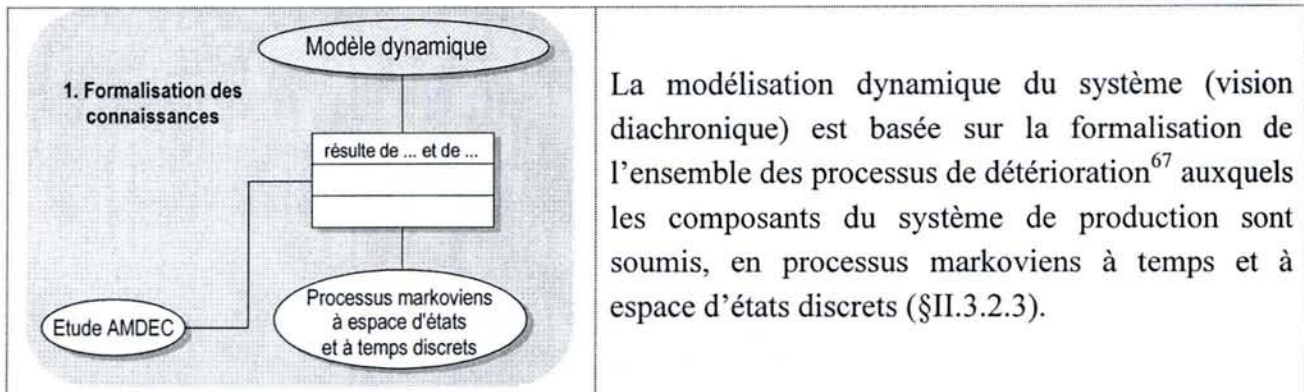
Etude HAZOP

L'étude HAZOP du sous-processus *Opérer la pression différentielle amont/aval* montre, quant à elle, que le flux produit *Flux d'eau aval* possède deux attributs ("Pression", "Débit") dont les déviations (PAS, PLUS ou MOINS) sont provoquées par le mode de dégradation "Perte d'étanchéité en position fermée" du support du sous-processus ou alors par la déviation d'un attribut du flux consommé *Flux d'eau amont* (Figure 59).

En traduisant l'ensemble de ces relations sous forme d'équations causales, on obtient finalement le modèle du fonctionnement du sous-processus *Opérer la pression différentielle amont/aval* suivant :

- Flux d'eau amont_n $\wedge$ Mouvement de rotation_n $\wedge$ Corps de vanne_n $\rightarrow$ Flux d'eau aval_n
- Corps de vanne_d (Erosion de l'obturateur) $\rightarrow$ Flux d'eau aval_d (PLUS de pression)
- Flux d'eau amont_d (Débit_{d,f}) $\rightarrow$ Flux d'eau aval_d (Débit_{d,f})
- Flux d'eau amont_d (Pression_{d,f}) $\rightarrow$ Flux d'eau aval_d (Pression_{d,f})
- Mouvement de rotation_d (Position angulaire_{d,f}) $\rightarrow$ Flux d'eau aval_d (Pression_{d,f})
- Mouvement de rotation_f (Vitesse angulaire_f) $\rightarrow$ Flux d'eau aval_d (Débit_f)

4.2. Modélisation de la dynamique du système de production



La démarche de modélisation de la dynamique du système de production consiste d'abord à sélectionner les modes de dégradation/défaillance "critiques"⁶⁸ recensés lors de l'étude AMDEC, puis à définir les dépendances stochastiques pouvant intervenir entre deux (ou plus) processus de détérioration responsables de l'occurrence des modes de dégradation/défaillance.

Ensuite, il s'agit de formaliser l'ensemble des mécanismes retenus sous forme de processus markoviens à temps et à espace d'états discrets.

Nous avons privilégié ce type de modélisation à cause des limites de calcul rencontrées dans le domaine continu.

En effet, l'exploitation des processus markoviens à temps et à espace d'états discrets repose sur l'équation de Chapman-Kolmogorov (25) qui fournit l'expression de l'état courant du processus π_k en fonction de son état initial π_0 et de la matrice $\mathbf{P}_{MC}$ [Cassandras *et al.*, 1999].

$$\pi_k = \pi_0 (\mathbf{P}_{MC})^k \text{ pour } k=1,2,\dots \quad (25)$$

Par contre, le traitement de processus continus est plus compliqué, et il faut faire appel dans ce cas à des méthodes de calcul numérique sophistiquées [Janssen *et al.*, 2002].

4.2.1. Sélection des modes de dégradation critiques

Cette première étape a déjà été réalisée lors de l'AMDEC. Cependant, le manque de précision et de formalisation des grilles d'évaluation de la criticité laisse place à la subjectivité du réalisateur de l'étude.

Dans ce contexte, il est nécessaire de s'assurer que les modes de dégradation/défaillance sélectionnés possèdent bien un impact significatif sur le comportement du système et sur ses performances, avant de déclencher la phase de modélisation des processus de détérioration responsables de leur occurrence.

⁶⁷ Mécanismes physiques de type : usure, fatigue, érosion, corrosion...

⁶⁸ Les processus de détérioration sont hiérarchisés selon leur criticité, et conservés dans l'analyse uniquement si leur criticité atteint le seuil fixé au préalable par l'analyste.

4.2.2. Dépendance des processus de détérioration

L'étude AMDEC n'identifie pas les risques d'interaction entre plusieurs mécanismes de détérioration : défaillance de cause commune, composants soumis à des chocs partagés, redondance...

Par conséquent, la deuxième étape de modélisation dynamique est consacrée à l'identification des dépendances⁶⁹ stochastiques pouvant exister entre les processus de détérioration sélectionnés dans l'étape précédente. Elle se concrétise par la formalisation des relations causales qualitatives de type **R8** (Figure 56).

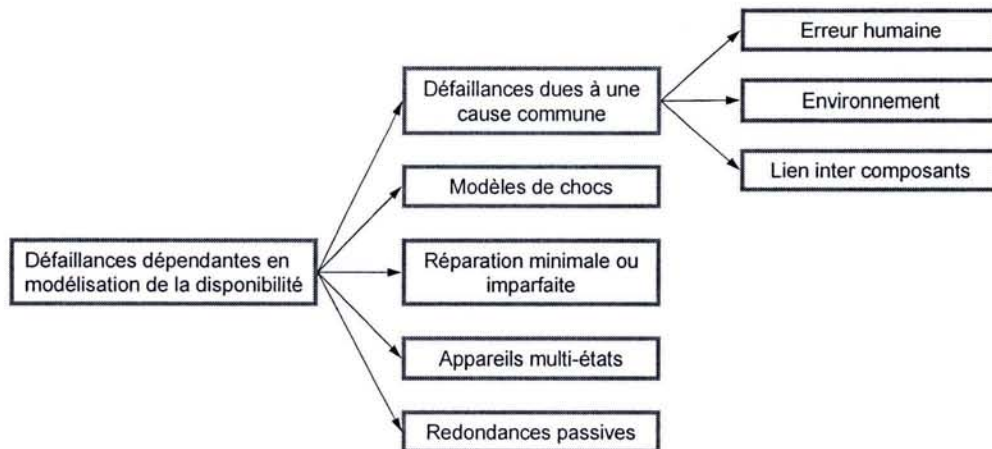


Figure 60 - Classification des modes de défaillances dépendants [Fricks *et al.*, 1997]

4.2.3. Modélisation des processus de détérioration sous forme de processus markoviens discrets

Les processus de détérioration sélectionnés au cours des deux étapes précédentes sont maintenant modélisés sous forme de processus markoviens à temps et à espace d'états discrets (§II.4.2.3). La quantification des paramètres des modèles markoviens n'est toutefois pas réalisée à ce stade de la méthodologie⁷⁰.

Cas des processus stochastiquement indépendants

La modélisation d'un processus de détérioration $\{X_k\}$ indépendant passe par l'identification de son espace d'états discrets χ^X puis la construction de sa matrice de passage $\mathbf{P}_X$. Les probabilités de transition $p_{ij}(k) = p(X_k = x_j | X_{k-1} = x_i)$ peuvent être indépendantes ou dépendantes de la valeur de k . Dans le premier cas, $\{X_k\}$ est qualifié de processus markovien homogène.

La formalisation d'un mécanisme physique de détérioration en processus markoviens à temps et à espace d'états discrets se complique lorsque le processus de détérioration est de nature semi-markovienne.

⁶⁹ Il existe une relation de dépendance (ou une interaction) entre deux processus de détérioration si la modification de l'état, ou d'un paramètre d'évolution, du premier influence le comportement du second.

⁷⁰ Elle le sera dans le §III.5.3. lorsque le formalisme de représentation du modèle comportemental sera choisi.

Dans ce cas, nous avons choisi de mettre en œuvre la *Méthode des états fictifs* qui permet de remplacer le processus semi-markovien réel par un processus markovien au comportement "équivalent".

Cas de processus stochastiquement dépendants

Afin de surmonter la difficulté de modélisation de processus stochastiquement dépendants, nous introduisons une méthode d'agrégation des processus dont le principe consiste à agréger les processus de détérioration interagissant au sein d'un modèle unique [Muppala *et al.*, 1995].

Exemple d'illustration : un composant est soumis à deux processus de détérioration $\{A_t\}$ et $\{B_t\}$ décrits respectivement par un espace d'états discrets χ^A et χ^B et des paramètres p_{ij} et p_{kl} (Figure 61a). $\{A_t\}$ et $\{B_t\}$ sont stochastiquement dépendants car lorsqu'un processus atteint l'état défaillant, le composant ne fonctionne plus et le second processus n'évolue plus.

L'agrégation des processus de détérioration $\{A_t\}$ et $\{B_t\}$ conduit à l'élaboration d'un "macro-processus" $\{AB_t\}$ défini de la manière suivante :

- les états χ^{AB} sont déterminés par combinaison des états χ^A et χ^B (création d'un macro-état défaillant $A_f \wedge B_f$ et suppression des états inatteignables Figure 61b),
- les paramètres d'évolution $p_{ik,jl}$ résultent du produit des paramètres p_{ij} et p_{kl} suivant l'équation (26) :

$$p_{ik,il} = (1 - \sum_{m \neq i} p_{im}) \cdot p_{kl} \text{ et } p_{ik,jk} = (1 - \sum_{n \neq k} p_{kn}) \cdot p_{ij} \quad (26)$$

Remarque : la méthode d'agrégation peut donner lieu à une agrégation de processus de tous types : markovien, semi-markovien, homogènes ou non homogènes.

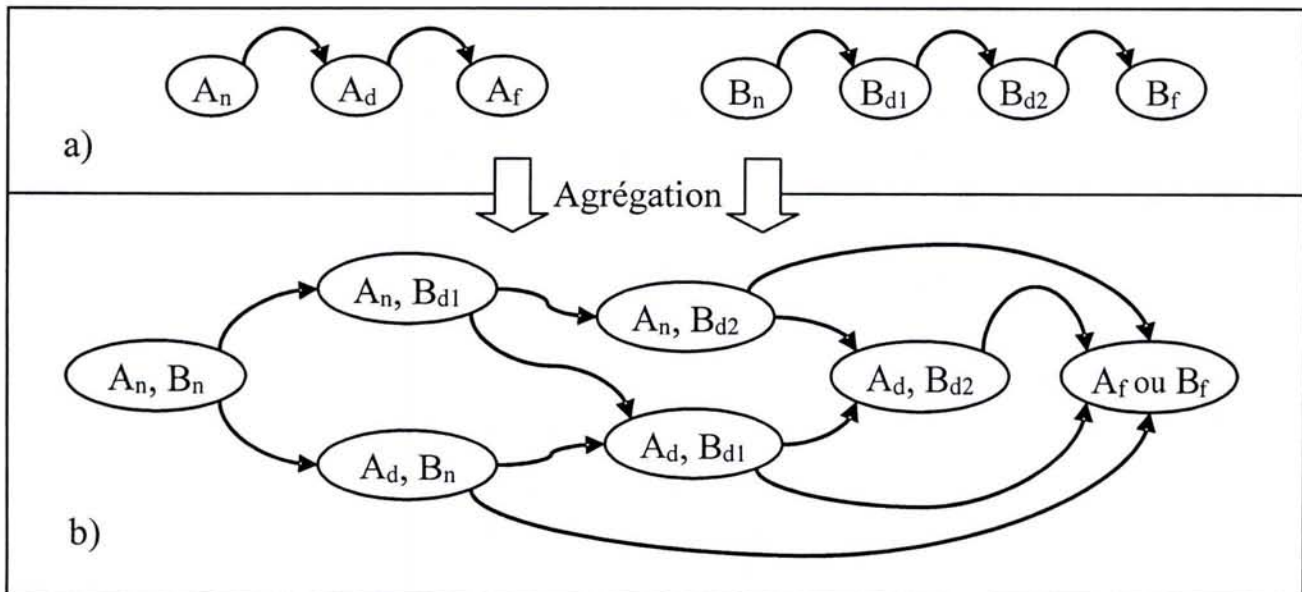


Figure 61 - Mécanisme d'agrégation de processus

4.2.4. Application : élaboration du modèle dynamique de la vanne de régulation

Dans l'étape précédente (§III.4.1.4), nous n'avons identifié qu'un seul processus de détérioration critique : le mécanisme d'érosion de l'obturateur.

Ce processus est sélectionné car son mode de dégradation associé "Perte d'étanchéité en position fermée" engendre un problème sécuritaire⁷¹ sur la plate-forme IMS.

Unique processus retenu dans notre analyse, il est par conséquent considéré comme indépendant.

En suivant l'avis des experts, le mécanisme d'érosion de l'obturateur est modélisé par un processus markovien $\{E\}$ caractérisé par (Figure 62) :

- un espace d'états discrets $\chi^E = \{OK, D_1, D_2, HS\}$; les états ont la signification suivante : *OK* (étanchéité parfaite), *D₁* (fuite de l'ordre d'1 litre pour 10 heures d'utilisation), *D₂* (fuite supérieure à 1 litre/heure) et *HS* (perte totale d'étanchéité) ;
- une matrice de passage $\mathbf{P}_E$ qui contient les paramètres du processus d'érosion, les probabilités de transition $p_{ij}(k) = p(E_k = e_j / E_{k-1} = e_i)$.

$$\mathbf{P}_E = \begin{bmatrix} - & p_{OK,D_1} & 0 & 0 \\ 0 & - & p_{D_1,D_2} & p_{D_1,HS} \\ 0 & 0 & - & p_{D_2,HS} \\ 0 & 0 & 0 & - \end{bmatrix}$$

NB : Les termes diagonaux sont égaux à 1 moins la somme des autres termes de la ligne

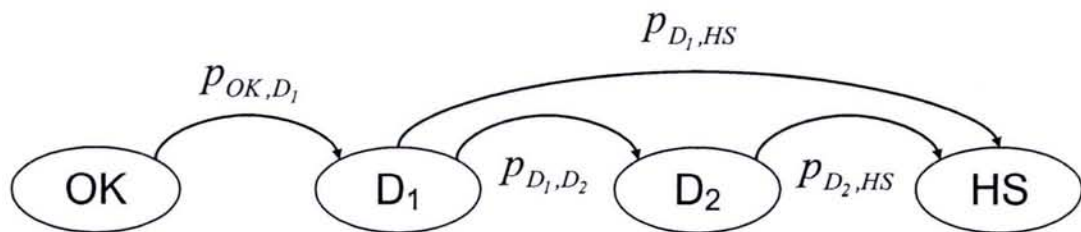
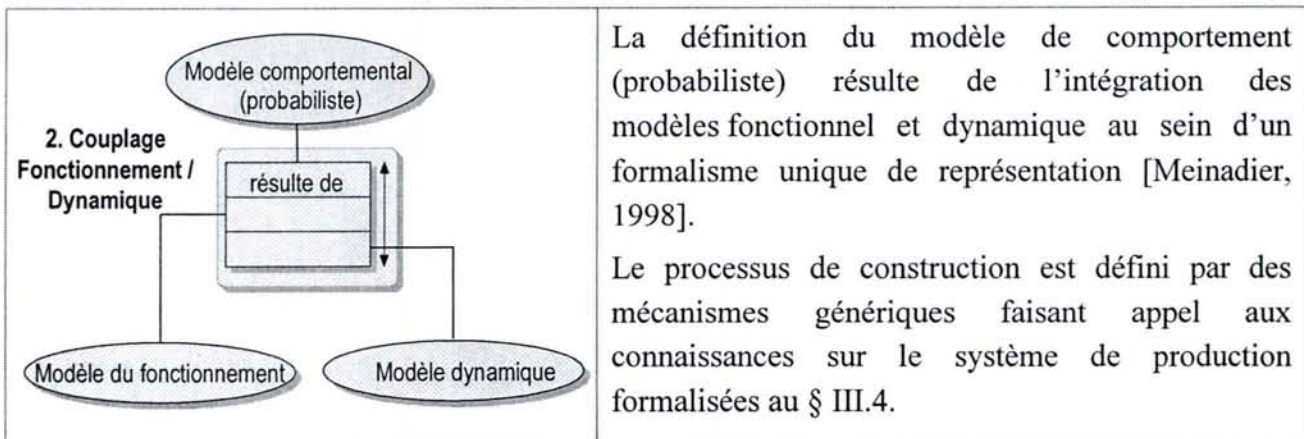


Figure 62 - Représentation de $\{E\}$ par un graphe de Markov

⁷¹ Risque de court-circuit électrique.

5. Elaboration du modèle probabiliste par combinaison des modèles Fonctionnel et Dynamique



Le rôle du modèle comportemental est primordial lors de la réalisation du pronostic. En effet, il supporte la simulation réalisée à partir d'un scénario combinant l'état de dégradation courant du système de production (fourni par le modèle événementiel de dégradation) et le plan de maintenance défini par le processus d'aide à la décision (fourni par le modèle événementiel de l'impact de la maintenance).

Remarque : l'intégration des modèles fonctionnel et dynamique n'est possible qu'à condition que les caractéristiques soumises à des propriétés diachroniques soient, à tout instant, compatibles avec les propriétés synchroniques susceptibles de les lier (principe de synchronisation de [Walliser, 1977]). Dans notre approche, ce sont les variables représentant la détérioration des supports de processus (présentes dans les deux modèles) qui assurent la synchronisation.

5.1. Choix du formalisme de représentation

Le modèle comportemental résulte de l'agrégation du modèle processus, des relations causales de type dégradation → cause → conséquences et des mécanismes de détérioration au sein d'un mode de représentation unifié.

Ainsi, le formalisme de représentation adopté doit être capable d'intégrer simultanément la structure du système de production (décrite par ses processus et ses flux), les mécanismes de causalité inter processus (formalisés par des relations causales qualitatives ou quantitatives) et les processus de détérioration intra processus (modélisés par des processus markoviens à espace d'états et à temps discrets).

De plus, il est préférable de disposer d'une méthode (et/ou un outil) de calcul couplée au formalisme afin d'analyser (quantitativement) le comportement dynamique du système de production.

Parmi les méthodes d'évaluation quantitative de la sûreté de fonctionnement, cinq semblent en mesure de répondre à ces exigences⁷² :

- les chaînes de Markov [Billinton *et al.*, 1983],
- les Réseaux de Petri Stochastiques (RdPS) [Dutuit *et al.*, 1997],
- les Réseaux Bayésiens Dynamiques⁷³ (RBD) [Weber *et al.*, 2005],
- les Arbres de Défaillances Dynamiques (ADD) [Dugan *et al.*, 1992],
- et le formalisme BDMP (Boolean logic Driven Markov Processes) introduit récemment par [Bouissou *et al.*, 2003].

Pour chacune d'entre elles sont distinguées deux phases distinctes de modélisation : la construction "graphique" du modèle (définition de la structure et des paramètres) et sa résolution par l'intermédiaire d'algorithmes de calcul [Volovoi, 2005]. En suivant l'exemple des études comparatives de [Rouvroye *et al.*, 2002], [Bobbio *et al.*, 2002] ou [Portinale *et al.*, 2004], nous avons retenu comme critères de sélection du formalisme du modèle de pronostic : d'une part, la puissance⁷⁴ du formalisme, la difficulté d'élaboration et la complexité (lisibilité) du modèle graphique et, d'autre part, la qualité des résultats, le temps d'exécution et la disponibilité d'outils supports des méthodes de résolution.

A l'issue de l'étude comparative des cinq formalismes retenus, dont les résultats sont synthétisés dans le Tableau 7, nous avons décidé :

- de délaisser la méthode des chaînes de Markov à cause du phénomène d'explosion combinatoire du nombre d'états et du manque de visibilité du formalisme dès qu'il s'agit de traiter des systèmes complexes [De Souza *et al.*, 1992] ;
- de rejeter les méthodes ADD et BDMP parce que leur mise en œuvre nécessite, soit de réaliser une simulation de Monte Carlo dont le temps d'exécution est prohibitif pour les systèmes complexes, soit de convertir les modèles obtenus dans un des trois autres formalismes étudiés [Manian *et al.*, 1998].

Par conséquent, nous conservons uniquement les RdPS et les RBD qui disposent d'outils de traitement performants basés respectivement sur des techniques de simulation (Monte Carlo ou autre) [Lindemann, 1998] et sur des algorithmes de calcul par inférence [Boyen *et al.*, 1998]. Malheureusement, le traitement des RdPS par simulation présente deux inconvénients majeurs :

- le temps de simulation devient rapidement prohibitif pour un système complexe car il faut dérouler un nombre d'histoires (de scénarios) suffisant pour obtenir des résultats quantitatifs acceptables.

⁷² On se trouve ici dans un cadre d'étude de "fiabilité dynamique" [Marseguerra *et al.*, 1998] où l'on cherche à évaluer la probabilité de défaillance d'un système complexe dont le modèle évolue dans le temps, en réponse à des événements dont l'origine peut être liée par exemple aux variations d'une variable environnementale ou opérationnelle ou à des interventions de maintenance.

⁷³ Nous parlons ici des RBD représentés sous forme compacte ou 2TBN (two time-slice Temporal Bayesian Network) [Boyen *et al.*, 1998] car dans notre cas le mode de représentation déroulée des RBD est inexploitable.

⁷⁴ Le terme "puissant" désigne ici un faible nombre d'hypothèses de modélisation restrictives à poser.

Méthode Critère		Chaîne de Markov	Réseau de Pétri stochastique	Réseau Bayésien Dynamique (compact)	Arbre de Défaillance Dynamique	Boolean logic Driven Markov Process
Modélisation	Puissance de modélisation	+	+	+	+	+
		Hypothèse markovienne d'ordre 1 (12), stationnarité*	Pas de limites de modélisation (incertitude, cycle...)	Hypothèse markovienne d'ordre 1*	Hypothèse markovienne d'ordre 1, stationnarité	Hypothèse markovienne d'ordre 1, stationnarité
	Difficulté d'élaboration du modèle	+	-	+	+	+
		Définition d'une procédure de construction nécessaire	Nombreuses extensions du formalisme (RdP colorés, stochastiques, temporels...) difficiles à combiner	Elaboration intuitive et conviviale du modèle causal	Elaboration simple et conviviale du modèle	Elaboration simple suivant le même principe que l'ADD
	Lisibilité du modèle graphique	-	+	+	+	+
		Phénomène d'explosion combinatoire du nombre d'états	Modèle lisible et clair, mais peu explicite sur la signification des places	Modèle explicite	Arbre dont la dimension augmente rapidement à la base	Structure arborescente multi niveaux
Résolution	Précision des résultats obtenus	+	-	+	+	-
		Résultat exact en cas de calcul analytique, approximatif sinon	Approximation dans la quasi totalité des cas : méthodes combinatoire ou markovienne, simulation numérique...	Utilisation possible d'algorithmes d'inférence exacte ou approximative	Variable suivant la méthode de résolution (Markovienne, simulation ou RBD)	Approximation basée sur une méthode de résolution markovienne
	Temps de résolution	+	-	+	+	+
		Pas de contrainte de temps, excepté pour une résolution par simulation	Résolution par simulation de Monte Carlo très coûteuse en temps de calcul	Temps acceptable, inférence approximative plus rapide	Idem : temps variable suivant la méthode de résolution	Temps acceptable, quelques heures pour un système complexe
	Disponibilité d'outil support	+	+	+	-	-
		Nombreux outils de traitement existants (CARE, MKV, SURF2, Supercab...)	Nombreux outils limités à certaines extensions de RdP (Design/CPN, GreatSPN, MissRdP)	Outils adaptés aux RBD compacts (BayesiaLab, BNT Matlab toolbox)	Peu d'outils complets développés (Galileo)	Pas d'outil disponible à l'heure actuelle

++ : Satisfaisant, + : Acceptable, +- : Variable, - : Difficile, -- : Prohibitif

* : hypothèses partiellement relâchées dans certains cas de figure

Tableau 7 - Étude comparative de différentes méthodes d'évaluation quantitative de la sûreté de fonctionnement de systèmes "complexes"

- la prise en compte d'événements rares est difficile car l'évaluation de la probabilité d'apparition est faussée en cas d'absence d'occurrence de l'événement dans les scénarios joués lors de la simulation.

Comme le processus de pronostic requiert une certaine rapidité d'exécution et qu'il est indispensable d'intégrer la présence de dégradations "lentes"⁷⁵ mais critiques, nous avons par conséquent délaissé le formalisme des RdPS au profit des RBD.

En effet, la simulation d'un RBD est nettement moins "gourmande" en temps de calcul que celle d'un RdPS. Elle s'appuie sur un mécanisme de propagation (causale et temporelle) des informations : l'**inférence**⁷⁶.

Les algorithmes d'inférence causale se classent en deux groupes : les méthodes d'inférences exactes, comme l'algorithme "Clustering" [Lauritzen *et al.*, 1988], et les méthodes approximatives, comme l'algorithme "Likelihood-Weighting" [Fung *et al.*, 1989]. Si l'inférence approximative permet, contrairement à l'inférence exacte, de modéliser des dépendances entre les processus stochastiques, elle présente toutefois un inconvénient majeur : les probabilités conditionnelles trop faibles risquent d'être négligées et par conséquent, l'occurrence de certains événements risque de ne pas être prise en compte lors de la simulation.

Le mécanisme d'inférence temporelle exact des RBD compacts est basé sur un algorithme itératif qui rétro-propage les probabilités marginales des noeuds de la tranche de temps $t+1$ sur la tranche t , puis met à jour les autres probabilités par le mécanisme d'inférence causale classique.

De ce fait, le temps de simulation d'un RBD est égal au temps d'exécution⁷⁷ de l'algorithme d'inférence causal du RB équivalent, multiplié par la période de simulation demandée. Par exemple, pour un RBD composé d'une centaine de variables à 3 ou 4 états, la durée d'une inférence d'un pas de temps varie d'une à vingt secondes en fonction de l'algorithme choisi.

5.2. Théorie des réseaux bayésiens et des réseaux bayésiens dynamiques

La modélisation par Réseaux Bayésiens (RB) permet de rassembler et de fusionner les connaissances de diverses natures formalisées dans la première étape de la méthodologie : données de retour d'expérience, expertise (exprimée sous forme de règles logiques, d'équations ou de probabilités subjectives), observations... dans un même modèle. Grâce à son graphe causal intuitif et compréhensible, le RB est un formalisme convivial permettant de représenter les dépendances entre les différentes variables d'un système donné. Il est aujourd'hui couramment employé pour le

⁷⁵ La dégradation lente est caractérisée par des probabilités d'évolution du même ordre de grandeur que celles associées à un événement rare.

⁷⁶ L'inférence dans un réseau bayésien se résume à un calcul de probabilités *a posteriori*. Connaissant les états de certaines variables, on détermine les probabilités des autres variables conditionnellement aux observations.

⁷⁷ Bien sûr, le temps d'exécution est proportionnel au nombre d'états du système.

raisonnement sous incertitude et la conception de systèmes experts et d'aide à la décision dans les domaines médicaux ou industriels [Przytula et al., 2000], [Lucas, 2001]...

5.2.1. Réseaux bayésiens

À la suite des travaux pionniers de [Pearl, 1988], les réseaux bayésiens ont émergé comme un formalisme puissant qui unifie différents concepts de modélisation probabiliste utilisés en statistique, intelligence artificielle, traitement du signal...

Définition : $B = (\zeta, \theta)$ est un réseau bayésien si $\zeta = (X, E)$ est un graphe acyclique dirigé (DAG) dont les sommets représentent un ensemble de variables aléatoires $X = \{X_1, \dots, X_n\}$, et si $\theta_i = [p(X_i / X_{Pa(X_i)})]$ est la table de probabilités conditionnelles (TPC) du nœud i connaissant l'état de ses parents⁷⁸ $Pa(X_i)$ dans ζ . Le réseau bayésien B représente donc une distribution de probabilité sur X qui admet la loi jointe suivante (27) :

$$p(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n p(X_i / X_{Pa(X_i)}) \quad (27)$$

Cette décomposition de la loi jointe est à l'origine d'algorithmes d'inférence puissants qui font des réseaux bayésiens des outils de modélisation et de raisonnement très pratiques lorsque les situations sont incertaines ou les données incomplètes [François et al., 2004].

5.2.2. Réseaux bayésiens dynamiques

Les Réseaux Bayésiens Dynamiques (RBD) introduits par [Dean et al., 1989] sont une généralisation des réseaux bayésiens à la modélisation de phénomènes temporels (processus de détérioration, par exemple). Ils généralisent les modèles de Markov cachés (HMM) et les systèmes dynamiques linéaires (LDS) en représentant les états cachés (et observés) en tant que variables d'états, possédant des interdépendances complexes [Murphy, 2002].

Si l'on considère une variable $X[t]$ évoluant dans le temps, le RBD représente la distribution de probabilité de cette variable sur l'intervalle $[0, T]$.

Il peut être modélisé sous forme d'un RB "statique" à T variables (solution déroulée⁷⁹ Figure 63a), ou alors sous forme compacte (Figure 63b) selon le formalisme canonique introduit par [Boyen et al., 1998], repris ensuite dans le contexte de la fiabilité dynamique par [Welch et al., 2000] puis [Weber et al., 2003].

Dans le deuxième cas, on représente uniquement deux tranches temporelles du réseau : $k-1$ et k . Le comportement du processus stochastique d'un pas de temps à un autre est décrit par la table de probabilités conditionnelles du nœud X_k .

Le RBD est exploitable s'il respecte les hypothèses suivantes [Murphy, 2002] :

- le temps est représenté de manière discrète, $k = 1, 2, \dots, T$ ($\Rightarrow$ processus à temps discret),

⁷⁸ Un nœud sans parent est un nœud racine. Il n'a pas de paramètres mais permet de modéliser une variable d'entrée exogène.

⁷⁹ Dont l'exploitation n'est envisageable que pour une période de temps limitée.

- les noeuds du RBD peuvent être regroupés par tranches temporelles qui contiennent n variables identiques : $X_1[k], \dots, X_n[k]$ ($\Rightarrow$ vision synchronique),
- les variables $X_i[k]$ d'une tranche k ne dépendent que d'autres variables de la même tranche ou de variables de la tranche précédente $k-1$ (hypothèse de Markov d'ordre 1 $\Rightarrow$ processus markoviens),
- les distributions de probabilités associées à ces dépendances sont indépendantes de la tranche k considérée (hypothèse de stationnarité $\Rightarrow$ processus homogène).

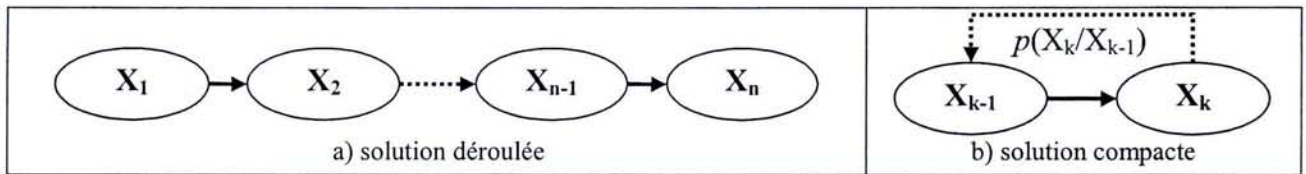


Figure 63 - Représentation d'un processus stochastique par RB et RBD

Ces quatre⁸⁰ hypothèses permettent de définir un modèle local (temporellement) $p(X_i[k]/Pa_i)$, qui décrit les dépendances entre les variables $X_i[k]$ et leurs parents Pa_i , indépendamment de l'indice de temps, puis de les réutiliser pour tout temps k , afin de définir le modèle global suivant l'équation de dérivation (28) :

$$p(X_1[0]...X_1[T],...,X_n[0]...X_n[T]) = p(X_1[0]...X_n[0]) \prod_{k=1}^T \prod_{i=1}^n p(X_i[k]/Pa_i) \quad (28)$$

Il faut alors définir la probabilité *a priori* $p(X_1[0]...X_n[0])$ sur la tranche de temps initiale ($k = 0$) pour mettre en œuvre le modèle.

Plus lisible et plus compact que le Graphe de Markov (GM), le RBD est un mode de représentation de processus [Weber *et al.*, 2002]. En effet, il peut être considéré comme une "factorisation" du GM car les relations causales réduisent le nombre de combinaisons d'états atteignables par le modèle (Figure 64).

Cependant, il y a équivalence stricte d'un point de vue calcul entre les GM et les RBD [Weber *et al.*, 2003].

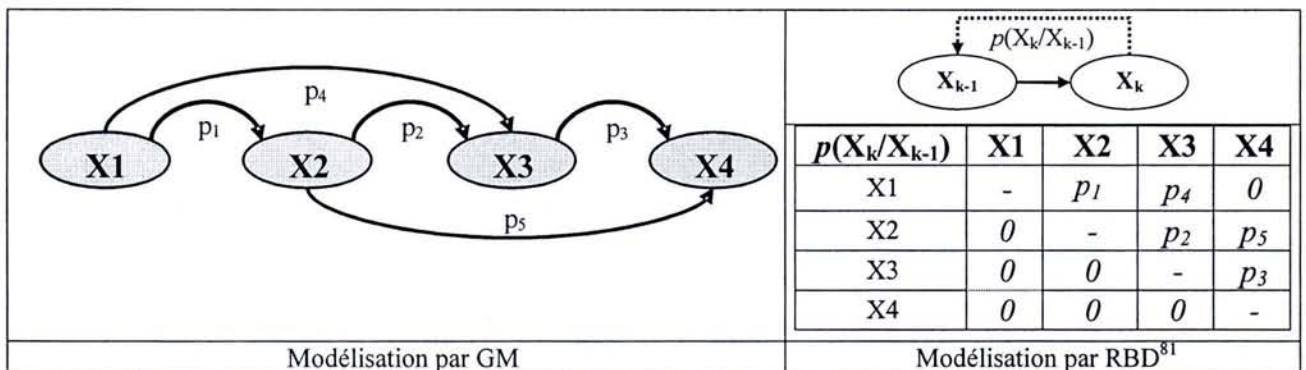


Figure 64 - Modélisation d'un processus markovien par GM et par RBD [Muller *et al.*, 2004d]

⁸⁰ La quatrième hypothèse peut être partiellement relâchée dans certains outils de mise en œuvre des RBD qui autorisent la définition de distributions de probabilités exprimées en fonction de la valeur de la tranche k . Dans ce cas, l'exploitation de processus non homogènes est envisageable.

⁸¹ Les termes diagonaux de la TPC sont égaux à 1 moins la somme des autres termes de la ligne.

5.3. Mécanismes génériques de construction du modèle comportemental

La méthodologie proposée introduit dans cette deuxième phase un ensemble de mécanismes génériques permettant de construire le modèle comportemental probabiliste à partir des connaissances formalisées au §III.4 (modélisation du fonctionnement et de la dynamique du système de production) et du formalisme des RBD.

La procédure d'élaboration du modèle probabiliste (réseau bayésien dynamique) se déroule en quatre temps :

- identification des variables du RBD,
- élaboration de la structure du réseau (création des arcs),
- définition des états des variables statiques,
- détermination des paramètres du modèle.

5.3.1. Identification des variables du RBD

Le principe de base de la création du RBD est d'associer une variable dynamique $X_i[k]$ à chaque processus de détérioration et une variable statique X_j à chaque attribut de flux identifié lors des étapes de formalisation §III.4.1 et §III.4.2.

Représentation des processus de détérioration

Par défaut, les supports de processus sont représentés par l nœuds dynamiques associés aux l processus de détérioration sélectionnés au §III.4.2.1. Cependant, s'il existe s processus interdépendants, la méthode d'agrégation est mise en œuvre et le nombre de nœuds dynamiques est réduit à $l-s+1$. Les espaces d'état $\chi^{X_i[k]}$ de ces variables dynamiques ont été définis lors de la modélisation des mécanismes de détérioration en processus markoviens (§III.4.2.3).

Lorsque la méthode des états fictifs est mise en œuvre, les états x_i n'ont pas de signification physique. Par contre, dans le cas d'une loi de dégradation par palier connue, les états x_i correspondent à des seuils de détérioration du support.

Leur sens est relatif au développement d'un phénomène physique (ex : taux d'oxydation ou de corrosion), ou aux conséquences directes de la détérioration sur les performances du processus (ex : perte de conductivité).

En définitive, le comportement du support SP_α du processus α est défini comme la combinaison des états de ses l processus de détérioration $\{X_i[k]\}_\alpha$ ce qui se traduit, en utilisant les notations du Tableau 5, de la façon suivante :

$SP_\alpha = \{X_1[k], X_2[k] \dots X_l[k]\}$	▪ $\{SP_n\}_\alpha = \{SP_\alpha / X_i[k] = x_{i_n} \forall i\}$
$\{X_i[k]\} = \{X_i[k]_n, X_i[k]_d, X_i[k]_{jf}\}$	▪ $\{SP_d\}_\alpha = \{SP_\alpha / X_i[k] = x_{i_d} \& X_j[k] \neq x_{j_f} \forall j\}$
	▪ $\{SP_{jf}\}_\alpha = \{SP_\alpha / X_i[k] = x_{i_f} \& X_j[k] \neq x_{j_f}, j \neq i\}$

Représentation des flux

Les flux sont représentés par m nœuds statiques associés aux m attributs identifiés lors de l'étude HAZOP (§III.4.1.3). L'état d'un flux F est défini comme la combinaison des états⁸² de ses m attributs (ex : un flux hydraulique est caractérisé par deux variables X_j , son *débit volumique* et sa *pression*). En reprenant les notations du Tableau 5, un flux F_α produit par un processus α est défini de la façon suivante :

$F_\alpha = \{X_1, X_2 \dots X_m\}$	$\square \{F_n\}_\alpha = \{F_\alpha / X_j = x_{jn} \ \forall j\}$
$\{X_j\} = \{X_{jn}, X_{jd}, X_{jf}\}$	$\square \{F_d\}_\alpha = \{F_\alpha / X_j = x_{jd} \ \& \ X_k \neq x_{kf} \ \forall k\}$
	$\square \{F_{ff}\}_\alpha = \{F_\alpha / X_j = x_{jf} \ \& \ X_k \neq x_{kf}; k \neq j\}$

5.3.2. Élaboration de la structure du réseau

La construction de la structure du RBD est basée sur la représentation des relations causales Ri formalisées au §III.4.1.3 par un ensemble d'arcs orientés⁸³ [E].

Comme les processus sont reliés les uns aux autres par les flux qu'ils s'échangent (un flux produit d'un processus amont devient un flux d'entrée pour un processus aval), la structure du RBD reflète bien le fonctionnement synchrone du système.

5.3.3. Définition des états des variables statiques

Les variables statiques X_j représentant les attributs de flux sont généralement de nature quantitative et continue. Toutefois, comme l'exploitation des RB continus⁸⁴ est difficile, les variables statiques X_j doivent être discrétisées⁸⁵.

La méthode de discrétisation proposée consiste à découper X_j en classes d'amplitude constante. Pour la mettre en œuvre, il est nécessaire de déterminer : l'espace d'états continu χ^{X_j} de la variable et le pas de discrétisation d^{X_j} .

- L'espace d'états χ^{X_j} est déterminé par combinaison des espaces d'état $\chi^{\text{Pa}(Y)}$ de parents $\text{Pa}(X_j)$ de l'attribut X_j , en utilisant la relation de causalité $X_j = f[\text{Pa}(X_j)]$.
- Le pas de discrétisation d^{X_j} est calculé afin d'obtenir des classes de valeurs X_j d'amplitude inférieure ou égale à l'incertitude associée à la mesure de l'attribut par le processus de surveillance.
- L'espace d'états χ^{X_j} est alors constitué de n intervalles :

$$\chi^{X_j} = \{[X_j \text{ min}, X_j \text{ min} + d^{X_j} [\dots [X_j \text{ max} - d^{X_j}, X_j \text{ max}] \}.$$

⁸² La définition des états des attributs est réalisée après la définition de la structure du RBD.

⁸³ Les arcs dirigés représentent les liens de dépendance conditionnelle (la causalité) entre les variables qu'ils relient. Par exemple, un arc e_{ij} allant d'une variable $X_i[k]$ à une variable X_j exprime l'impact d'un processus de détérioration i sur un attribut de flux j .

⁸⁴ RB qui intègre des variables continues.

⁸⁵ La discrétisation est une opération qui consiste à découper une variable quantitative continue, pouvant comporter une infinité de valeurs, en un nombre fini d'états, correspondant à des intervalles de valeurs.

Exemple d'illustration : l'attribut Y est défini par la relation $Y=Y_1+Y_2$; Y_1 et Y_2 étant définis sur les espace d'états $\chi^{Y_1}=[a_1, b_1]$ et $\chi^{Y_2}=[a_2, b_2]$; Y est observé avec une incertitude⁸⁶ c .

- En "additionnant" χ^{Y_1} et χ^{Y_2} , on obtient $\chi^Y=[a_1+a_2, b_1+b_2]$.
- L'incertitude c associée à la mesure de Y permet de déterminer le nombre (entier) d'états n :

$$n \geq \frac{(b_1+b_2)-(a_1+a_2)}{2c}$$
, puis le pas de discrétisation $d^Y = \frac{(b_1+b_2)-(a_1+a_2)}{n}$.
- On obtient un espace d'états final $\chi^Y = \{[a_1+a_2, a_1+a_2+d^Y], \dots, [b_1+b_2-d^Y, b_1+b_2]\}$.

5.3.4. Détermination des paramètres du modèle

La dernière étape de construction du RBD est certainement la plus difficile : il s'agit de définir l'ensemble des tables de probabilités conditionnelles (TPC) associées à chaque nœud du réseau. Pour y parvenir, deux solutions (qui peuvent être combinées) se présentent :

- Réaliser un apprentissage sur un jeu de données [Heckerman *et al.*, 1995].
- Faire appel à des connaissances expertes [Corset *et al.*, 2003].

Le choix de la solution dépend des connaissances disponibles sur le fonctionnement du système de production.

Apprentissage des paramètres

Il est indispensable d'être en possession d'une base de données de retour d'expérience (REX) pour mettre en œuvre un algorithme d'apprentissage. Bien sûr, la qualité des paramètres obtenus dépend de la quantité et de la représentativité des données disponibles.

Dans notre cas, la structure du RBD est déjà définie. Seul l'apprentissage des paramètres est nécessaire. Il existe une large palette d'algorithmes pour y parvenir, à commencer par un simple apprentissage paramétrique (parcours de l'ensemble des cas décrits par la base et mise en accord des différentes tables de probabilités avec les fréquences rencontrées) (Figure 65).

		Structure	
		connue	inconnue
Données	complètes	- Approche bayésienne - Maximum de vraisemblance - MAP (Maximum <i>a posteriori</i>) ...	- Recherche d'un arbre optimum (MWST) - Algorithme K2 - Algorithme PC - Algorithme de recherche gloutonne (GS, greedy search)
	incomplètes	- Algorithme EM (Expectation-Maximisation), - EM + MAP	Combinaison de méthodes

Figure 65 - Méthodes d'apprentissage [Bendou *et al.*, 2003], [Jouffe, 2002]

⁸⁶ L'incertitude c est une incertitude de mesure caractérisant l'étendue des valeurs dans laquelle se situe la valeur vraie de Y .

Dans un RBD où toutes les variables sont observables, l'apprentissage se résume à un simple dénombrement (29). Mais lorsque certaines variables sont cachées, les algorithmes d'apprentissage sont plus complexes [Neapolitan, 2003].

$$p(X_j = x_j / Pa(X_j) = Pa_k) = \frac{N(X_j = x_j, Pa(X_j) = Pa_k)}{N(Pa(X_j) = Pa_k)} \quad (29)$$

avec N : nombre d'individus présents dans la base de données et Pa_k : combinaison d'états des parents de X_j

Exploitation d'expertise

Les probabilités de transition des processus markoviens formalisés au §III.4.2.3 peuvent être estimées *a priori* grâce à de l'expertise (données constructeur, base de données de fiabilité...). L'efficacité de cette solution repose entièrement sur la compétence des experts.

Toutefois, au fil du temps, des données de REX vont servir régulièrement à mettre à jour les probabilités, grâce à la démarche bayésienne [Procaccia *et al.*, 2003] (§II.3.2.3.4).

Le remplissage des tables de probabilités conditionnelles des variables statiques peut être effectué de la même manière.

Cependant, nous privilégions une autre solution qui consiste à identifier puis à exploiter la loi physique qui régit les mécanismes de causalité entre les attributs de flux et leurs parents.

Si cette loi peut s'écrire sous forme d'équations déterministes, son codage dans une TPC permet de calculer l'ensemble des probabilités conditionnelles. Cette procédure sera décrite par la suite lors de l'élaboration du RBD associé à la vanne de régulation.

5.3.5. Application : élaboration du modèle probabiliste de la vanne de régulation

Nous allons maintenant construire le RBD modélisant le comportement du sous-processus *Opérer la différence de pression*.

• Identification des variables

- Le *corps de vanne*, support du processus, est représenté par une variable dynamique $E[k]$ dont les caractéristiques ont déjà été détaillées au §III.4.2.4.
- Le flux *Mouvement de rotation* est caractérisé par deux attributs "Vitesse angulaire" et "Position angulaire" auxquels sont associées deux variables statiques ω et X .
- Les *flux d'eau amont* et *aval* sont théoriquement représentés par un couple de variables (Pression P , Débit Q). Sachant que la vanne est étanche ($Q_e = Q_s = Q$) et que la pression différentielle $\Delta P = P_s - P_e$ est l'indicateur de performance du processus, nous représentons uniquement les deux variables Q et ΔP .

- **Elaboration de la structure**

- Les relations causales formalisées dans le §III.4.1.4 se traduisent par la création de quatre arcs (Figure 66b). L'arc [E₁] traduit, par exemple, la relation : Corps de vanne_d (Erosion de l'obturateur) → Flux d'eau aval_d (PLUS de pression) alors que l'arc [E₂] traduit la relation : Mouvement de rotation_d (Position angulaire_{d v t}) → Flux d'eau aval_d (Pression_{d v t}).

- **Définition des variables statiques**

- L'espace d'états continu χ^{AP} est déterminé par combinaison des espaces d'états :

- $\chi^Q = [1,95 ; 2,55]$,
- $\chi^\omega = \{OK, HS\}$,
- $\chi^X = [0,15 ; 0,95]$ et
- $\chi^E = \{OK, D_1, D_2, HS\}$.

Sachant que l'état du processus {E} est déterminé directement par la valeur du coefficient de forme⁸⁷ Kv de la vanne, l'espace d'états χ^E s'écrit aussi sous la forme : $\chi^E = \{[Kv_0 ; 0,98 Kv_0], [0,98 Kv_0 ; 0,95 Kv_0], [0,95 Kv_0 ; 0,9 Kv_0], [0,9 Kv_0 ; 0,8 Kv_0]\}$.

- La loi physique qui relie ΔP à ses parents est la suivante (30) [AFNOR, 1984] :

$$\Delta p = \left(\frac{Q}{Kv_i X} \right)^2 \frac{\rho}{1000} \quad (30)$$

avec Q : débit (m³/h), ρ : densité de l'eau (kg/m³) → supposée constante, $\Delta p = p_2 - p_1$: différence de pression (bar) et X : position angulaire (%)

- En exploitant cette équation et les valeurs maximales et minimales de chacune des variables, on obtient finalement : $\chi^{\Delta P} = [0,013 ; 1,267]$.

Sachant que le capteur qui mesure la pression différentielle est précis à $\pm 0,05$, le nombre d'états de la variable ΔP est fixé à 13.

On obtient alors $p^{\Delta P} = 0,1$ et $\chi^{\Delta P} = \{[0 ; 0,1], [0,1 ; 0,2], \dots [1,2 ; 1,3]\}$.

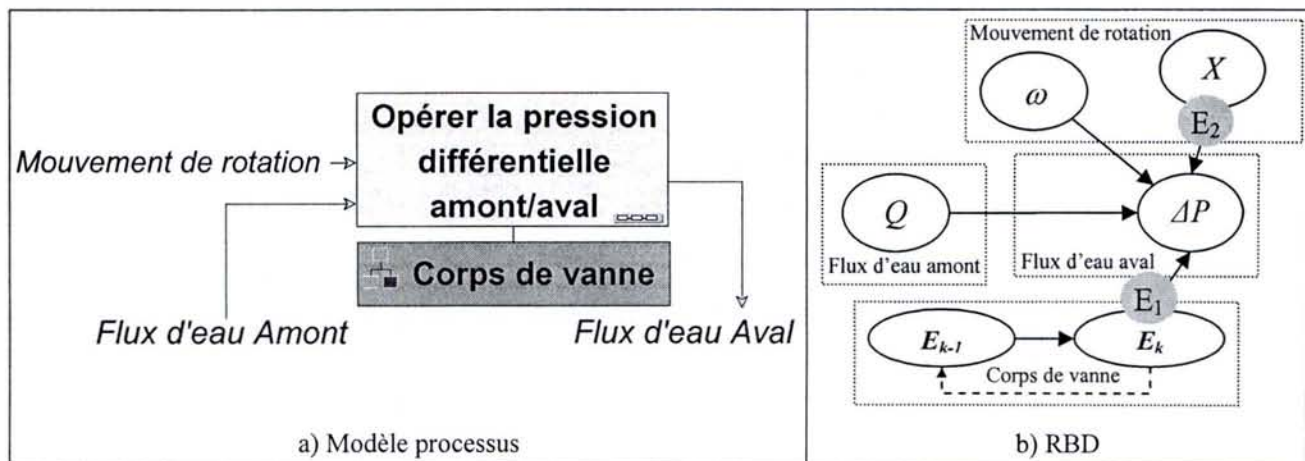


Figure 66 - Elaboration du RBD du sous-processus *Opérer la différence de pression amont/aval*

⁸⁷ Kv correspond au nombre de m³ d'eau traversant la vanne en une heure, sous une perte de charge de 1 bar.

- **Détermination des paramètres**

- Les probabilités de transition (exprimées en pourcentage) du processus $\{E\}$ ont été estimées par expertise à partir de connaissances disponibles sur des vannes similaires, ce qui donne la TPC θ_E suivante :

$\begin{matrix} E(k+1) \\ \backslash \\ E(k) \end{matrix}$	HS	D ₂	D ₁	OK
HS	100	0	0	0
D ₂	0,6	99,4	0	0
D ₁	0,05	0,25	99,7	0
OK	0	0	0,1	99,9

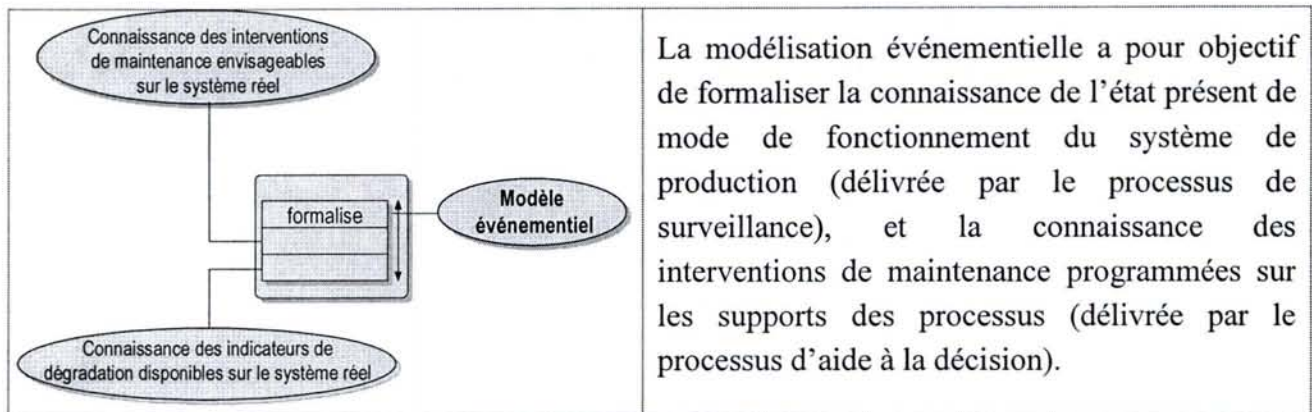
Interprétation : lorsque le processus $\{E\}$ est dans l'état D_1 à l'instant $k-1$, il y a 99,7% de chance qu'il y soit encore à l'instant k , 0,25% de chance qu'il soit passé à l'état D_2 et 0,05% de chance qu'il soit passé à l'état HS .

- La description de la TPC $\theta_{\Delta P}$ est réalisée à partir de l'équation déterministe (30) et de l'état de variable ω :

• $\Delta P =$
<i>Si</i> $\omega = OK$ <i>Alors</i> : $\left(\frac{Q}{Kv_s X} \right)^2 \frac{\rho}{1000}$ <i>Sinon</i> $[0 ; 0,1[$

Interprétation : si la vitesse de rotation de l'obturateur est suffisante ($\omega = OK$), la différence de pression ΔP est calculée à partir de l'équation (30). Sinon, la différence de pression est nulle, la variable ΔP se trouve dans l'état $[0 ; 0,1[$.

6. Elaboration du modèle événementiel



6.1.1. Modélisation événementielle de la dégradation

La méthode de modélisation événementielle de la dégradation consiste à associer des variables "événementielles" aux processus de détérioration et aux attributs de flux du modèle probabiliste, dont l'état peut être observé par le processus de surveillance.

En réalité, ces variables événementielles correspondent aux indicateurs de dégradation construits à partir d'une équation qui intègre les variables et les paramètres physiques **observables** et **mesurables** du procédé (§II.2.1). Afin de simplifier son exploitation future par le processus de pronostic, l'indicateur d'un processus de détérioration $Z_{Xi[k]}$ ou d'un attribut de flux Z_{Xj} peut être discrétisé par le processus de surveillance de manière à établir une correspondance directe entre ses états et ceux du processus de détérioration ou de la déviation de flux associé(e) (Figure 67) :

▪	$Z_{Xi[k]} = z_i$	$\Leftrightarrow$	$X_i[k] = x_i$	$\forall i$
▪	$Z_{Xj} = z_j$	$\Leftrightarrow$	$X_j = x_j$	$\forall j$

En pratique, il est difficile d'élaborer un indicateur pour chaque processus de détérioration et pour chaque déviation de flux à cause du problème d'observabilité évoqué précédemment, et aussi, du manque d'instrumentation disponible sur le procédé physique (insuffisante généralement pour couvrir l'ensemble du système de production). Par conséquent, le nombre de variables du modèle événementiel de la dégradation sera très inférieur au nombre de variables du RBD.

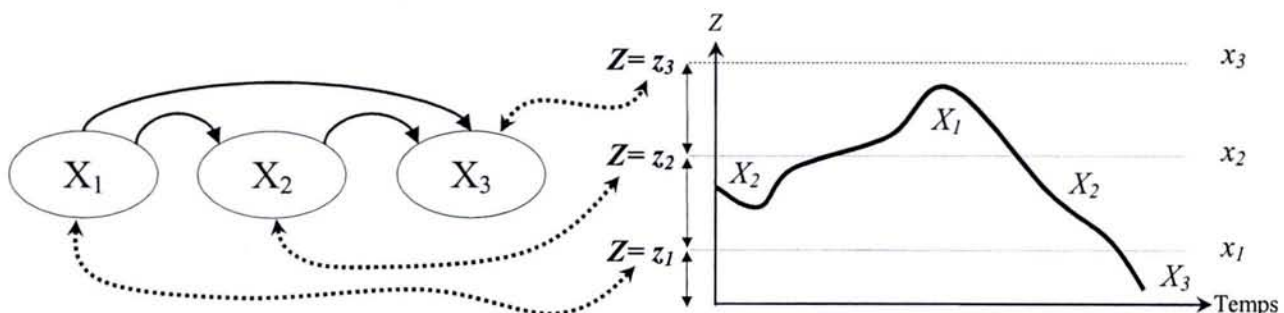


Figure 67 - Discrétisation d'un indicateur à partir d'une variable du RBD

6.1.2. Modélisation événementielle de la maintenance

La modélisation événementielle de la maintenance consiste à associer une variable "événementielle" booléenne⁸⁸ à chaque intervention de maintenance (périodique ou apériodique) recensée par le processus d'aide à la décision.

Une variable événementielle de maintenance du type Intervention_{composant} se trouve par défaut dans l'état Faux.

Dès que l'intervention est programmée⁸⁹ à un instant l , la variable Intervention_{composant} prend l'état Vrai :

$\bullet \quad p(\text{Intervention}_{\text{composant } k} = \text{Vrai}) = 1 \text{ si } k = l \quad \left \quad p(\text{Intervention}_{\text{composant } k} = \text{Vrai}) = 0 \text{ si } k \neq l \right.$

6.1.3. Application : élaboration du modèle événementiel de la vanne de régulation

La plate-forme IMS dispose d'un système d'instrumentation permettant de mesurer et de contrôler la position X de rotation de l'obturateur de la vanne et le débit Q . Ainsi, le processus de surveillance élabore deux indicateurs Z_X et Z_Q associés aux attributs de flux "X" et "Q".

- Le modèle événementiel de la dégradation est donc constitué de deux variables événementielles : Z_X et Z_Q .

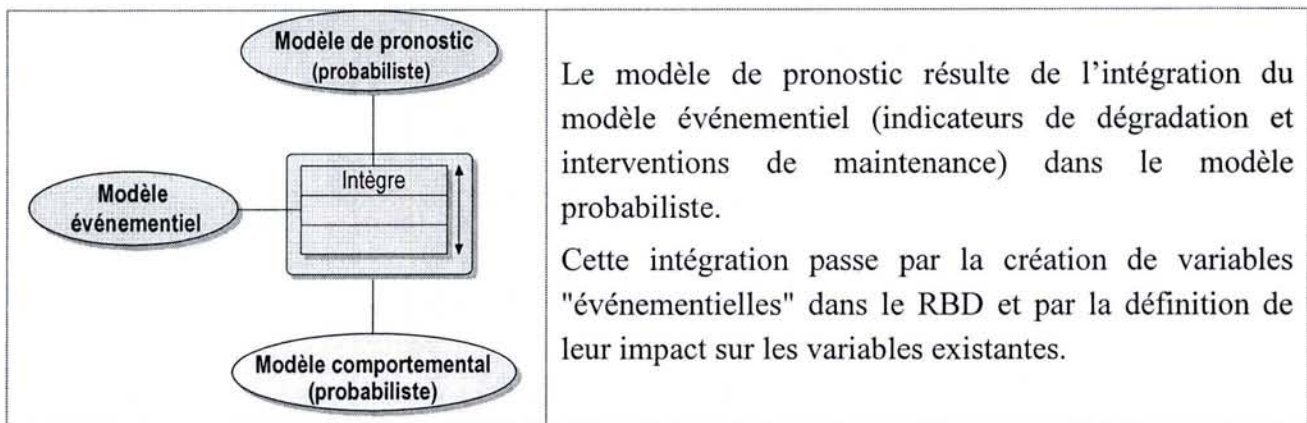
D'un point de vue maintenance, la seule intervention recensée sur la vanne de régulation est un démontage/nettoyage périodique ($T=500$) de l'obturateur qui donne lieu à une réparation en cas de dégradation significative.

- Le modèle événementiel de la maintenance est donc constitué d'une variable périodique REP_{Corps}.

⁸⁸ Caractérisée par un espace d'états {Vrai, Faux}.

⁸⁹ Nous supposons que la durée de l'intervention de maintenance est négligeable par rapport à l'échelle de temps de la dégradation.

7. Construction du modèle de pronostic par couplage des modèles probabiliste et événementiel



7.1.1. Intégration des indicateurs de dégradation

L'intégration du modèle événementiel de la dégradation dans le modèle probabiliste se déroule en trois étapes :

- introduction dans le modèle probabiliste élaboré au §III.5 d'un couple de variables d'observation : $Z(\text{Variable observée})$, $\text{Dispo } Z(\text{Variable observée})$ associées aux variables évènementielles identifiées au §III.6,
- création d'arcs entre les variables d'observation et les variables observées⁹⁰,
- mise à jour des TPC des variables observées.

Les états de la variable d'observation $Z(\text{Variable observée})$ sont basés sur les états de la variable évènementielle $Z_{\text{Variable observée}}$ associée.

$\text{Dispo } Z(\text{Variable observée})$ est une variable booléenne d'espace d'états {Vrai, Faux} où l'état Faux correspond à une absence d'observation.

Ensuite, la création des arcs $[Z(\text{Variable observée}) \rightarrow \text{Variable observée}]$ et $[\text{Dispo } Z(\text{Variable observée}) \rightarrow \text{Variable observée}]$ engendre la remise à jour de la TPC $\theta_{\text{Variable observée}}$.

Cette remise à jour définit l'impact (et le poids) de l'observation par rapport à l'état courant de la variable du RBD.

Dans l'approche proposée, l'observation de l'état courant d'une variable est prioritaire sur la valeur *a priori* de la variable, ce qui signifie que la variable observée adopte l'état de l'observation lorsque cette dernière est disponible :

• Variable observée =

Si $\text{Dispo } Z(\text{Variable observée}) = \text{Vrai}$ Alors $Z(\text{Variable observée})$

⁹⁰ La variable observée est la variable du RBD dont l'état est déterminé par l'indicateur de dégradation.

7.1.2. Intégration des interventions de maintenance

Le principe d'intégration des interventions de maintenance dans le modèle probabiliste est le même que celui défini pour l'intégration des indicateurs de dégradation :

- Introduction dans le modèle probabiliste élaboré au §III.5 de variables statiques de maintenance : *Intervention*_{composant} associées aux variables événementielles identifiées au §III.6.
- Création d'arcs entre les variables de maintenance et les variables dynamiques des processus de détérioration affectés par les interventions de maintenance.
- Mise à jour des TPC des variables dynamiques concernées.

Les variables booléennes de maintenance sont reliées aux variables dynamiques représentant les processus de détérioration affectés par l'intervention de maintenance. La création des arcs [I Composant → Processus X] engendre la remise à jour des TPC $\theta_{\text{Processus } X}$. Cette remise à jour est plus délicate à réaliser que dans le cas des indicateurs de dégradation, puisque l'impact de la maintenance sur les processus de détérioration dépend cette fois de l'efficacité⁹¹ des interventions.

Quelle que soit cette efficacité, l'impact d'une intervention de maintenance *Intervention*_{composant} sur un processus de détérioration {X} d'espace d'états $\chi^X = \{x1, x2... xn\}$ est formalisé dans la TPC $\theta_{\text{Processus } X}$, par l'intermédiaire des probabilités conditionnelles :

▪ $p(X_{k+1} = xi / \text{Intervention}_{\text{composant } k} = \text{Vrai}, X_k = xi)$	avec $i=1...n$
---	----------------

Efficacité d'une intervention de maintenance

Les interventions de maintenance sont classées selon plusieurs critères comme le type d'intervention (corrective ou préventive) ou l'efficacité de l'intervention (de la réparation minimale à la réparation parfaite) [Pham *et al.*, 1996].

- La *maintenance parfaite* est associée au modèle "As Good As New" (AGAN) qui restaure le processus de détérioration {X} dans l'état nominal $x1$ après l'intervention :

▪ $p(X_{k+1} = x1 / \text{Intervention}_{\text{composant } k} = \text{Vrai}) = 1$	avec $i=1...n$
▪ $p(X_{k+1} \neq x1 / \text{Intervention}_{\text{composant } k} = \text{Vrai}) = 0$	

Ce type de modèle est bien adapté à une opération de remplacement de composant mais il l'est moins à une réparation partielle ou à une action de maintenance préventive. En fiabilité, l'hypothèse AGAN donne lieu à une modélisation du comportement du système concerné par un processus de renouvellement [Barlow *et al.*, 1960].

- La *maintenance imparfaite* est basée sur le principe que l'efficacité d'une intervention de maintenance est incertaine et qu'elle ne restaure pas le processus de détérioration {X} dans l'état nominal $x1$. Généralement, l'impact d'une intervention imparfaite est modélisé par une réduction du taux de défaillance ou de l'âge virtuel du système [Doyen *et al.*, 2004].

⁹¹ L'efficacité de la maintenance correspond au degré de restauration, après intervention, d'un composant ayant subi une défaillance ou une dégradation.

- Dans notre approche, l'impact d'une intervention se traduit par une remise à jour de l'état du processus de détérioration [Muller *et al.*, 2003c] dans un état "moins dégradé" :

▪ $p(X_{k+1} = xi / \text{Intervention composant } k = \text{Vrai}, X_k = xi)$	avec $i=1 \dots n$
▪ $p(X_k = x1) < p(X_{k+1} = x1) < 1$	

7.1.3. Application : élaboration du modèle de pronostic de la vanne de régulation

L'introduction des indicateurs Z_X et Z_Q formalisés au §III.6.1.3 engendre la création de deux couples de variables "événementielles" dans le modèle probabiliste : $Z(X)$, $\text{Dispo } Z(X)$ et $Z(Q)$, $\text{Dispo } Z(Q)$ d'espace d'états respectifs $\chi^{Z(X)} = [0,15 ; 0,95]$, $\chi^{\text{Dispo } Z(X)} = \{\text{Vrai}, \text{Faux}\}$ et $\chi^{Z(Q)} = [1,95 ; 2,55]$, $\chi^{\text{Dispo } Z(Q)} = \{\text{Vrai}, \text{Faux}\}$.

Chaque variable est reliée à la variable du modèle probabiliste qu'elle influence (Figure 68).

Les TPC θ_Q et θ_X sont alors mises à jour grâce à l'intégration des équations déterministes suivantes :

▪ Q =	▪ X =
Si $\text{Dispo } Z(Q) = \text{Vrai}$ Alors $Z(Q)$	Si $\text{Dispo } Z(X) = \text{Vrai}$ Alors $Z(X)$

L'introduction de l'intervention de maintenance formalisée au §III.6.1.3 engendre la création de la variable REP Corps d'espace d'états $\{\text{Vrai}, \text{Faux}\}$ dans le modèle probabiliste.

L'efficacité de cette intervention imparfaite est définie dans la TPC θ_E :

▪ $p(E_k = \text{OK} / \text{REP Corps } k-1, E_{k-1} = \text{OK}) = 1$	▪ $p(E_k = \text{HS} / \text{REP Corps } k-1, E_{k-1} = \text{HS}) = 1$
$p(E_k = \text{OK} / \text{REP Corps } k-1, E_{k-1} = D_1) = 0,8$	▪ $p(E_k = D_1 / \text{REP Corps } k-1, E_{k-1} = D_1) = 0,2$
$p(E_k = \text{OK} / \text{REP Corps } k-1, E_{k-1} = D_2) = 0,1$	$p(E_k = D_1 / \text{REP Corps } k-1, E_{k-1} = D_2) = 0,6$
▪ $p(E_k = D_2 / \text{REP Corps } k-1, E_{k-1} = D_2) = 0,3$	

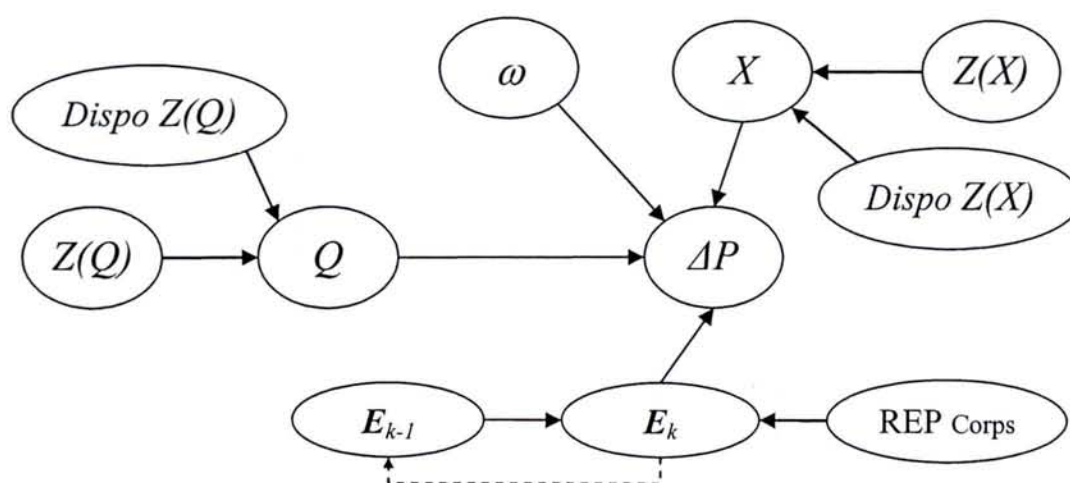


Figure 68 - Modèle de pronostic du sous-processus Opérer la différence de pression amont/aval

8. Mise en œuvre du processus de pronostic par couplage des modèles événementiel et probabiliste

La mise en œuvre du processus de pronostic fait appel successivement aux modèles événementiel **E** et probabiliste **P** afin de bénéficier simultanément de la connaissance *a priori* du comportement du système et du suivi *on-line* de son évolution réelle.

Conformément au mode de fonctionnement décrit aux chapitres II et III, la réalisation d'un pronostic à l'instant $k=T$ se déroule en trois étapes (Figure 69) :

1. Initialisation du modèle de pronostic grâce à l'identification de l'état courant du système fourni par le processus de surveillance au modèle événementiel (**E**).
2. Définition d'un scénario de simulation suivant le plan de maintenance retenu par le processus d'aide à la décision sur la période $[k=0, k=T]$ (**E**).
3. Réalisation du pronostic par inférence itérative du modèle de pronostic (**P**).

En fonction des résultats obtenus, le processus de pronostic peut être réitéré avec une situation courante du procédé de fabrication ou un plan de maintenance différent.

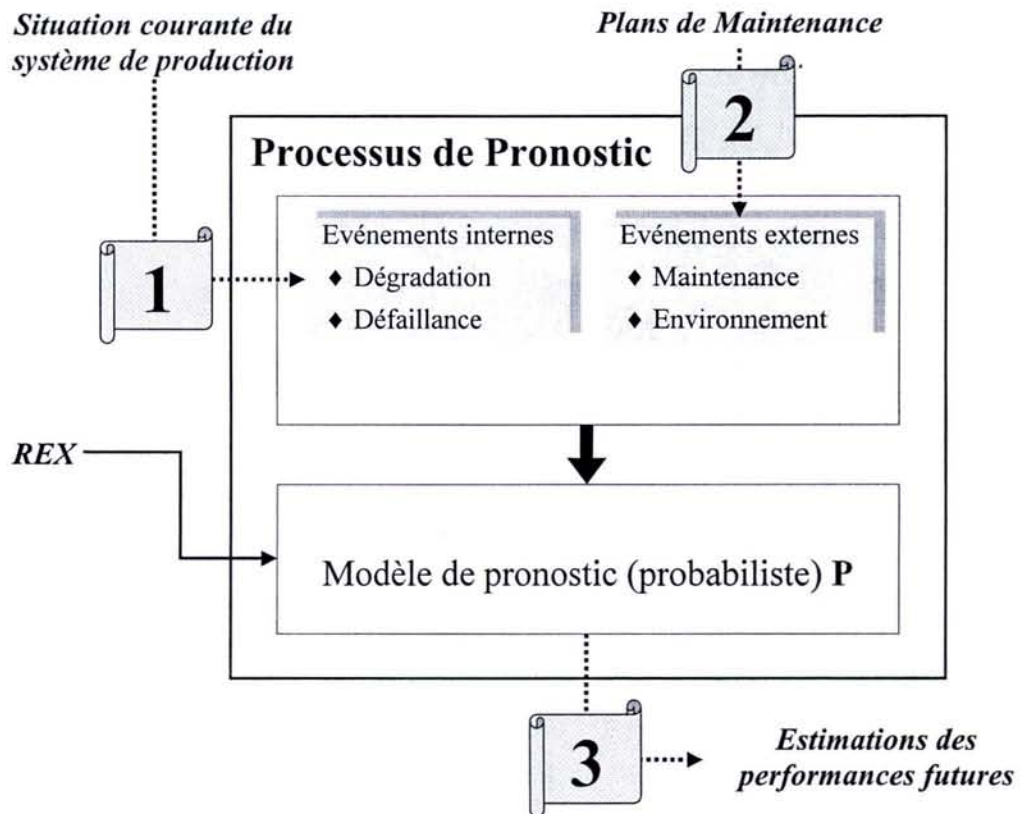


Figure 69 - Mise en œuvre du processus de pronostic

8.1. Support du modèle de pronostic

Le modèle de pronostic est supporté par l'outil BAYESIA Lab⁹² qui intègre le mode de représentation compacte des RBD et l'algorithme d'inférence associé à son traitement. Grâce à ses fonctionnalités spécifiques (Tableau 8), le logiciel s'adapte particulièrement bien au déploiement du processus de pronostic. L'introduction d'une variable temporelle dans les TPC permet notamment d'exploiter certaines classes de processus non homogènes.

Fonctionnalités de BAYESIA Lab	Intérêt vis-à-vis du pronostic
Représentation des RBD sous forme compacte et algorithme d'inférence associé	Modélisation de systèmes complexes envisageable
Définition des TPC par l'intermédiaire d'équations déterministes ou probabilistes	Détermination des paramètres du modèle de pronostic plus facile
Exploitation possible d'un noeud Temps dans les tables de probabilités conditionnelles	Modélisation de processus non homogènes
Apprentissage de la structure et des paramètres des RB à partir de base de données	Exploitation de données de retour d'expérience
Intégration de nœuds décisionnels	Modélisation de différents modes de marche du système de production
Intégration de nœuds "Coût"	Construction d'indicateurs de performance
Spécification de fichiers d'observations	Initialisation du modèle probabiliste
Simulation temporelle pas à pas, ou par période avec édition graphique des évolutions de probabilités	Réalisation du pronostic

Tableau 8 - Fonctionnalités intéressantes de BAYESIA Lab dans l'optique du pronostic

8.2. Réalisation du pronostic

La réalisation du processus de pronostic sur la période $[k=0, k=T]$ débute par la mise à jour du modèle événementiel par rapport aux informations délivrées par les processus de surveillance et d'aide à la décision. L'intégration de l'état du modèle événementiel à $k=0$ dans le modèle de pronostic permet alors de l'initialiser et de lui associer un scénario de simulation sur la période $[k=0, k=T]$.

Ensuite, la simulation basée sur le mécanisme d'inférence temporelle et sur le scénario défini précédemment est réalisée.

⁹² Informations disponibles sur <http://www.bayesia.com/FR/produits/bLab/BlabPresentation.php>

8.2.1. Initialisation du modèle de pronostic

L'initialisation du modèle de pronostic a pour objectif de synchroniser le RBD par rapport à l'état courant du système de production. D'un point de vue probabiliste, l'opération se traduit par l'injection des observations du processus de surveillance au modèle probabiliste sous forme d'évidences⁹³ sur les variables événementielles de dégradation $Dispo\ Z(Variable\ observée)$ et $Z(Variable\ observée)$.

- S'il n'y a pas d'incertitude sur l'état de l'indicateur $Z_{Variable\ observée}$, la variable $Z(Variable\ observée)$ est fixée dans un état spécifique x_f (31) : on parle alors d'*évidence forte* notée : E_i .

$$E_i : p(Z(Variable\ observée) = x_f)_{k=0} = 1 \quad (31)$$

- Sinon, le RBD reçoit une *évidence faible* (notée : e_i) qui met à jour la distribution de probabilités de $Z(Variable\ observée)$ en fonction de la valeur observée de $Z_{Variable\ observée}$ et de son intervalle de confiance associé (32).

$$e_i : p(Z(Variable\ observée) = x_i)_{k=0} < 1, \forall i. \quad (32)$$

Dans un cas comme dans l'autre, il est nécessaire de spécifier au préalable que l'observation de variable est disponible (33) :

$$p(Dispo\ Z(Variable\ observée) = Vrai)_{k=0} \quad (33)$$

Le mécanisme d'inférence causale propage alors l'impact de ces observations sur le modèle de pronostic en actualisant les distributions de probabilités des variables non observées par rapport à l'état des variables observées.

8.2.2. Elaboration du pronostic

Le scénario de simulation intègre les actions de maintenance planifiées par le processus d'aide à la décision sur la période $[k=0, k=T]$.

Dès qu'une intervention de maintenance est planifiée à un instant l , il y a injection d'une évidence forte E_{mce} (34) sur la variable événementielle de maintenance associée à cette intervention :

$$E_{mce} : p(Intervention_{composant} = Vrai)_{k=l} = 1 \quad (34)$$

Ainsi, à chaque instant k , le mécanisme d'inférence causale propage l'impact des interventions de maintenance réalisées à l'instant $k-1$ au reste du RBD.

8.2.3. Simulation basée sur le mécanisme d'inférence temporelle

La simulation attendue est réalisée par BAYESIA Lab, sur la période de temps T , à partir : du modèle de pronostic, d'un fichier d'observations intégrant l'état courant du modèle événementiel

⁹³ On désigne par évidence le fait de déterminer l'état d'une variable d'un RB en fonction d'une observation.

et de l'algorithme d'inférence temporelle du logiciel qui s'appuie sur le principe d'inférence itérative, détaillé au §III.5.1.

8.2.4. Application : réalisation du pronostic de la vanne de régulation

Nous allons maintenant réaliser le pronostic du sous-processus *Opérer la différence de pression amont/aval* à l'instant $k=1000$, à partir de l'état courant du modèle événementiel : $X_0 = 20\%$ et $Q_0 = 2,2 \text{ dm}^3.\text{mn}^{-1}$, sachant que la réparation du corps de vanne est prévue à $k=500$ (informations fournies par les processus de surveillance et d'aide à la décision de la plate-forme IMS).

Ces informations sont intégrées au modèle probabiliste par un fichier d'observations comprenant les évidences suivantes :

$E1 \quad p(Z(X) = [0,15 ; 0,25])_{k=0} = 1$ $p(\text{Dispo } Z(X) = \text{Vrai})_{k=0} = 1$	$E2 \quad p(Z(Q) = [2,15 ; 2,25])_{k=0} = 1$ $p(\text{Dispo } Z(Q) = \text{Vrai})_{k=0} = 1$
$E3 \quad p(\text{REP corps de vanne} = \text{Vrai})_{k=500} = 1$	

- **Initialisation du modèle de pronostic**

L'injection des évidences $E1$ et $E2$, et leur propagation par le mécanisme d'inférence causale, initialise l'état de l'ensemble des variables du modèle de pronostic (Figure 70).

- **Scénario de simulation**

La durée de simulation est de 1000 unités de temps. L'évidence $E3$ (intervention de maintenance préventive sur le corps de vanne) est injectée au modèle de pronostic à $k=500$.

Elle engendre une modification de l'état des variables du RBD causée par la remise à jour de l'état de la variable $E(k)$.

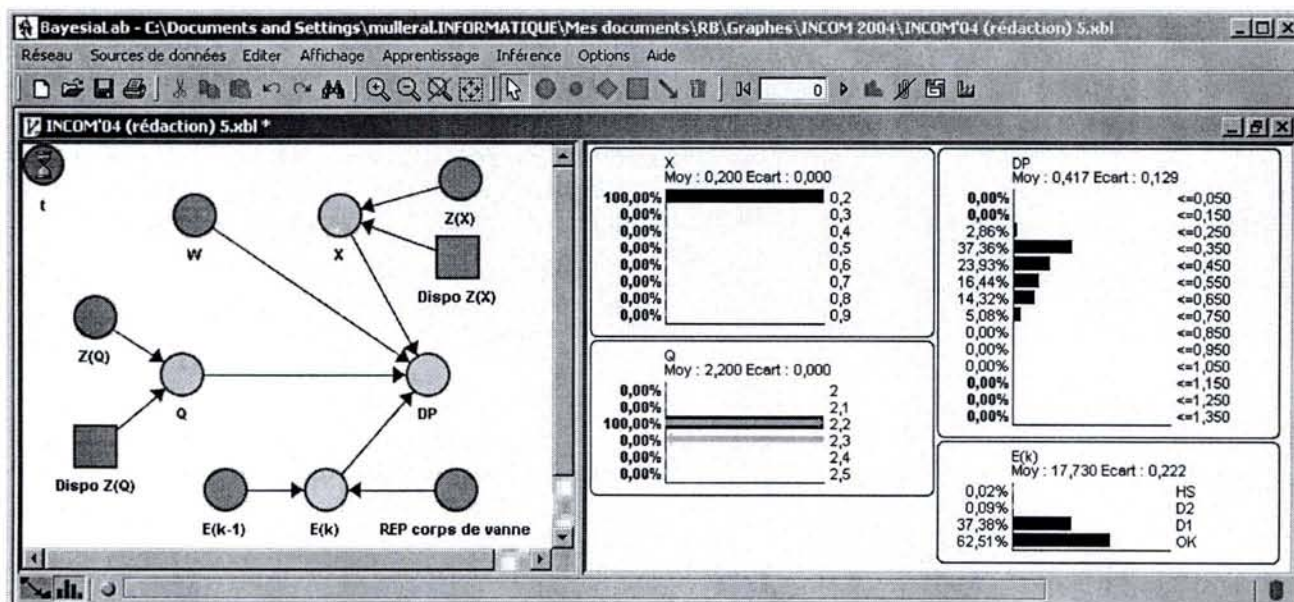


Figure 70 - Initialisation du modèle de pronostic

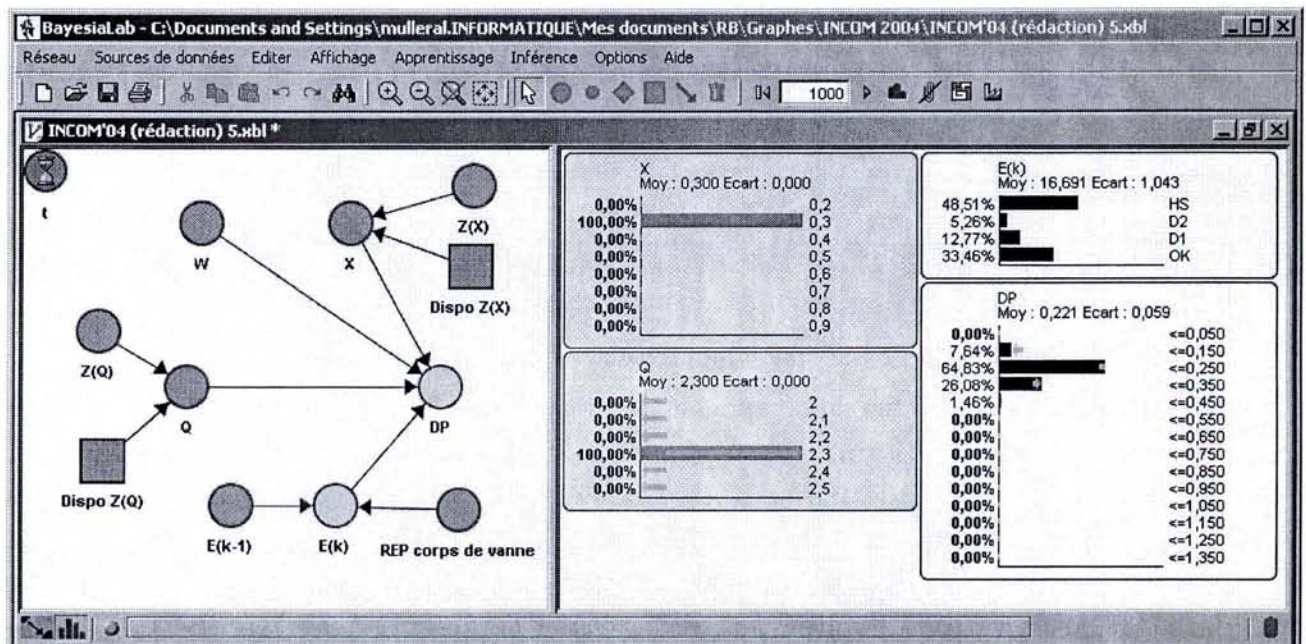


Figure 71 - Résultats de la simulation

• Simulation

La Figure 71 décrit les résultats du processus de pronostic (estimation de l'état de l'obturateur de la vanne via la variable $E(k)$ et estimation de la performance du sous-processus *Opérer la différence de pression amont/aval* via la variable ΔP) à $k=1000$, avec $X = 0,3$ et $Q = 2,3$.

Par rapport à la situation initiale (Figure 70) et malgré l'intervention de maintenance, l'état de l'obturateur s'est fortement dégradé sur la période de simulation avec plus de 48% de chance d'être dans l'état défaillant à $k=1000$.

L'évaluation de la perte de performance associée doit être effectuée comparativement à la différence de pression attendue par le système dans les conditions d'utilisation $X = 0,3$ et $Q = 2,3$.

8.3. Procédure de mise à jour du modèle de pronostic

En phase d'exploitation, le mécanisme de couplage des approches probabiliste et événementielle intervient également lorsque les paramètres du modèle probabiliste sont remis à jour grâce à la base de données de retour d'expérience constituée par historisation des variables issues du modèle événementiel ($E \rightarrow P$). Il s'agit d'actualiser l'ensemble des tables de probabilités conditionnelles du RBD, c'est-à-dire les TPC des processus de détérioration (nœuds dynamiques) et les TPC des attributs de flux (nœuds statiques), selon l'approche bayésienne décrite au §II.3.2.3.4.

9. Conclusion

La méthodologie de modélisation du processus de pronostic proposée dans ce chapitre repose sur trois étapes clés (Figure 44) :

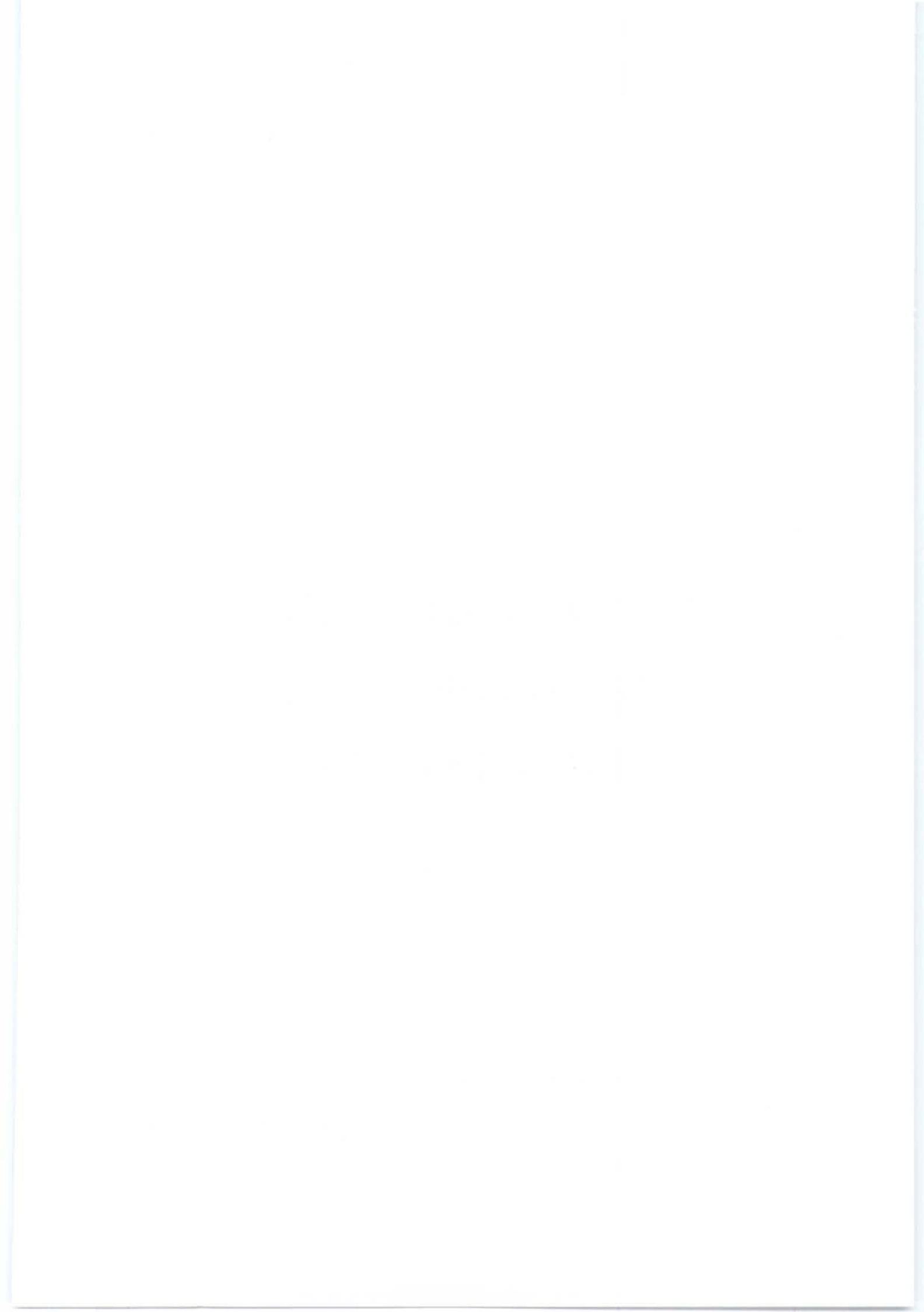
- la formalisation des connaissances nécessaires à l'élaboration du processus de pronostic,
- la construction des modèles probabiliste (comportemental) et événementiel et
- la réalisation finale du pronostic par couplage des approches probabiliste et événementielle.

Applicable aussi bien au niveau du composant qu'au niveau du procédé, la méthodologie proposée repose sur la combinaison des trois types d'approches de pronostic détaillées au chapitre II.

Le respect de concepts, de méthodes, de modèles dont la pertinence et l'efficacité ont été reconnues par la communauté scientifique et industrielle, apporte une première garantie de la validité de la démarche proposée. Cependant, une validation complète ne peut être réalisée sans la construction puis la mise en œuvre du processus de pronostic sur un cas d'application réel. C'est précisément l'objectif du chapitre IV dans lequel nous développons le processus de pronostic sur un système "complexe" de Déroulage/Pressage de la plate-forme d'intégration AIPL en télémaintenance.

Chapitre IV

Construction et mise en œuvre
du processus de pronostic sur la
plate-forme TELMA



IV. Construction et mise en œuvre du processus de pronostic sur la plate-forme TELMA

1. Introduction

Dans le chapitre III, nous avons proposé une méthodologie de modélisation d'un processus de pronostic adapté au déploiement d'une stratégie de maintenance prévisionnelle sur un système de production de type "manufacturier".

Pour valider la démarche de développement du processus, il est nécessaire de l'appliquer sur un système proche de la réalité industrielle actuelle en matière de technologies, de complexité ou d'intégration matérielle et logicielle...

En ce sens, le chapitre IV décrit la mise en œuvre du processus de pronostic sur un des quatre processus du système de Déroulage / Pressage de la plate-forme d'expérimentation TELMA (TELÉMAintenance) de l'AIPL⁹⁴.

Afin de démontrer la faisabilité de la méthodologie développée, nous proposons de construire le processus de pronostic sur ce système complexe réel (multi-composants, multi-états soumis à des interactions multiples), suivant la procédure⁹⁵ définie au chapitre précédent :

- Formalisation des connaissances nécessaires à la construction du modèle probabiliste (étape concrétisée par la construction d'un modèle du fonctionnement et d'un modèle dynamique).
- Élaboration du modèle probabiliste (comportemental) par couplage des deux modèles précédents (utilisation de mécanismes génériques de construction).
- Élaboration du modèle événementiel à partir de connaissances issues des processus de surveillance et d'aide à la décision du système intégré de maintenance prévisionnelle.
- Construction du modèle de pronostic par couplage des modèles probabiliste et événementiel.

Ensuite, le processus de pronostic est mis en œuvre sur le procédé physique réel avec des ressources logicielles et matérielles concrètes permettant ainsi de montrer la faisabilité de la méthodologie d'un point de vue "opérationnel"⁹⁶.

Enfin, la dernière partie du chapitre est consacrée à l'analyse préliminaire de la validité des résultats fournis par le processus de pronostic.

⁹⁴ L'AIPL (Atelier Inter-Établissement de Productique Lorrain) est un centre de ressources régional utilisé comme support expérimental de formations approfondies dans le domaine de la Productique et de la conception intégrée en mécanique.

⁹⁵ Les notations utilisées dans ce chapitre pour désigner les différents éléments de la modélisation sont synthétisées en fin de document.

⁹⁶ Architecture de type e-maintenance.

2. Présentation de la plate-forme TELMA

La plate-forme d'intégration AIPL en Télémaintenance (TELMA) est une plate-forme pédagogique ouverte sur l'extérieur⁹⁷, en relation avec les nouveaux besoins exprimés par les entreprises, notamment dans les domaines de la maintenance, de la sûreté de fonctionnement et de la qualité, liés au développement des TIC.

Ainsi, sa vocation est de mettre en avant l'efficacité des organisations modernes et des nouveaux outils de maintenance (maintenance prévisionnelle, maintenance collaborative, e-maintenance, télésurveillance...) sur la disponibilité, les coûts et la qualité de fabrication d'un système de production.

2.1. Description du procédé physique

La plate-forme est architecturée autour d'un système mécanique simulant le déroulement de produit en bande continue, servant une presse verticale (Figure 72). Ce type de systèmes est particulièrement présent dans l'industrie lorraine (sidérurgie, papeterie, imprimerie...). L'alimentation de produit est simulée en entrée par un système automatisé de changement de bobines, constitué d'un barillet supportant deux bobines, entraîné par un vérin pneumatique.

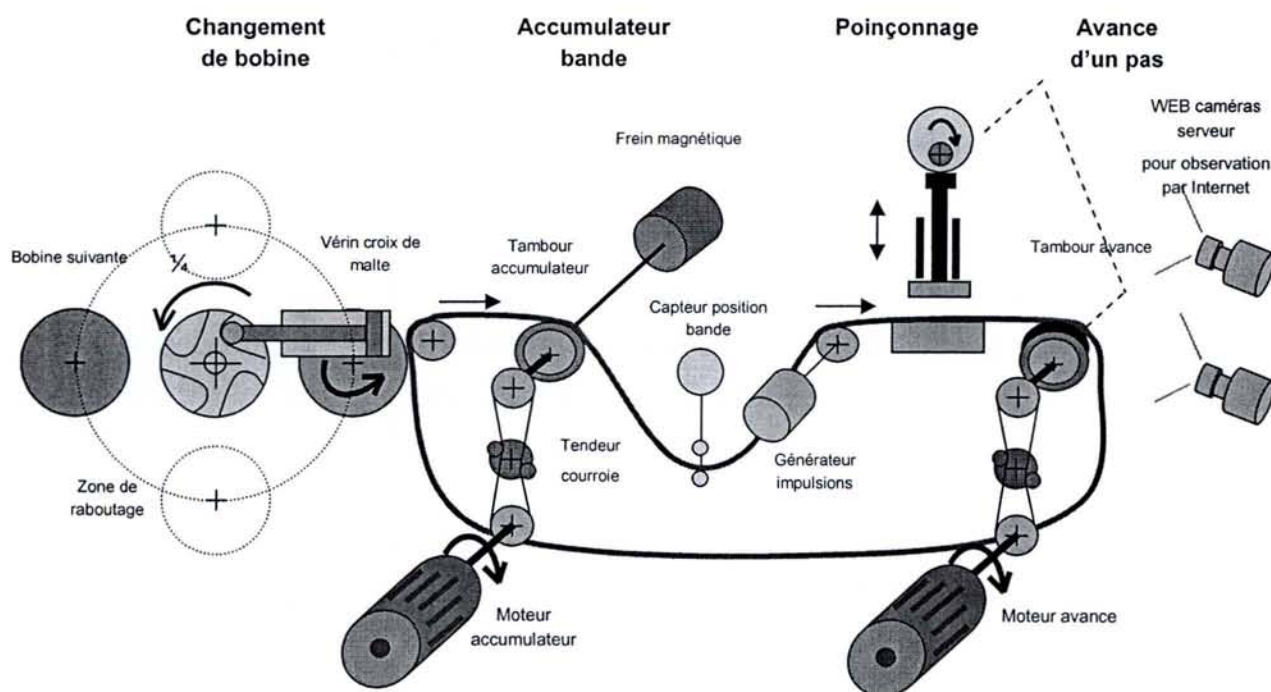


Figure 72 - Principe de fonctionnement de la plate-forme TELMA

⁹⁷ La plate-forme est accessible à distance par le Web à tout moment, elle fonctionne 24h/24h et 7jours/7 sans personnel spécialisé, ni encadrement à proximité.

Le produit est matérialisé par une bande continue, dont l'avance est assurée par deux systèmes mécaniques d'entraînement :

- Le premier achemine le produit en entrée de la presse, en assurant une tension constante de la bande, contrôlée par un capteur, afin d'éliminer les risques de déchirement du produit. Un frein magnétique permet de simuler l'inertie de la bobine, variant en fonction de sa dimension lors du déroulement.
- Le second système en aval tire sur le produit pour l'amener sous la presse, en respectant des exigences strictes de positionnement du produit. Ce système assure également l'animation du poinçon de la presse.

Une Web caméra permet de visualiser à distance et à tout moment le système en fonctionnement.

2.2. Description de l'architecture de commande

Les ressources de la plate-forme TELMA sont pilotées et synchronisées par des processus d'automatisation communiquant par réseaux de terrain (Ethernet Industriel), ouverts vers le niveau Entreprise (Ethernet AIP - Intranet) et son environnement (Internet). Les différents pré-actionneurs, capteurs, pupitre d'Interface Homme-Machine, Webcam, Automates Web de la plate-forme sont reliés à un poste local de supervision qui permet d'accéder aux configurations des composants (programmes, paramètres de fonctionnement) ainsi qu'à leurs états et à leurs valeurs courants (Figure 73). Ce poste met ensuite, via un serveur OPC (OLE for Process Control), ses informations à disposition d'un système de gestion de configuration de matériel et d'un serveur Web qui ouvre l'architecture vers le réseau Internet.

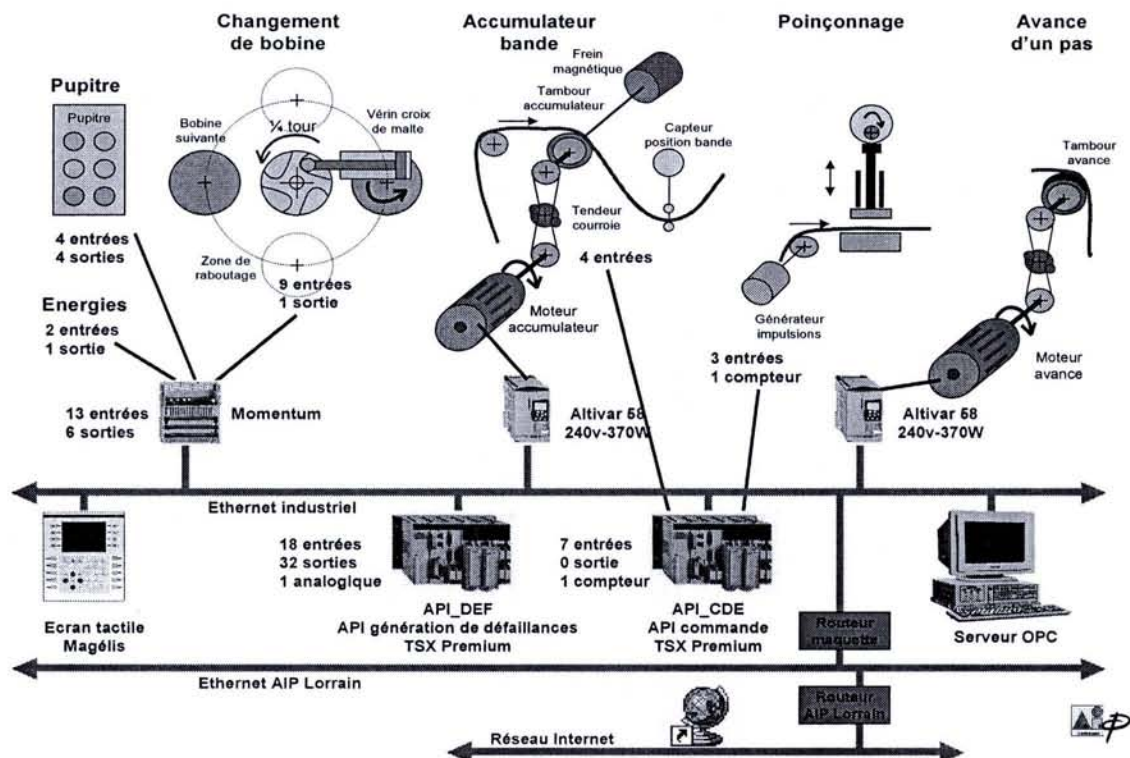


Figure 73 - Architecture de commande de la plate-forme TELMA

Remarque : dans cette architecture, un automate ainsi qu'un ensemble de composants spécialisés sont dédiés spécifiquement à la génération de dégradations ou de défaillances (coupure de connexion, défauts actionneurs ou capteurs...). Le système de génération de dégradations/défaillances permet d'injecter des événements dysfonctionnels et d'en évaluer les conséquences sur le comportement du procédé de fabrication.

2.3. Description de l'architecture de maintenance

Le système d'information de maintenance de la plate-forme TELMA est basé sur un couplage GMAO/MAO dont le fonctionnement a été détaillé au §I3.1.1.2. Le progiciel de GMAO Empacix⁹⁸ (version fullWeb) assure la gestion des interventions et de la logistique de maintenance au niveau management, alors que le progiciel de télémaintenance CASIP réalise les traitements de maintenance de bas niveau : suivi des dérives de fonctionnement, détection de défauts...

2.3.1. Un système d'information de maintenance intégré

Techniquement, l'intégration du SI de maintenance de TELMA est supportée partiellement par la suite CASIP qui exploite, d'une part, le protocole standard TCP/IP pour communiquer avec les niveaux management de l'Entreprise (ERP) et suivi de production (MES) et, d'autre part, le standard de communication OPC (OLE for Process Control) pour garantir la communication avec le système de production. Par ailleurs, un serveur DDE (Dynamic Data Exchange) permet à tout PC connecté à la plate-forme CASIP d'extraire des informations de maintenance et de surveillance.

2.3.1.1. Intégration au niveau opérationnel

Le progiciel CASIP permet de développer des algorithmes de traitements des données et des informations venant du procédé physique afin d'élaborer les indicateurs de suivi et de mettre à jour une base de données de retour d'expérience (Figure 74a).

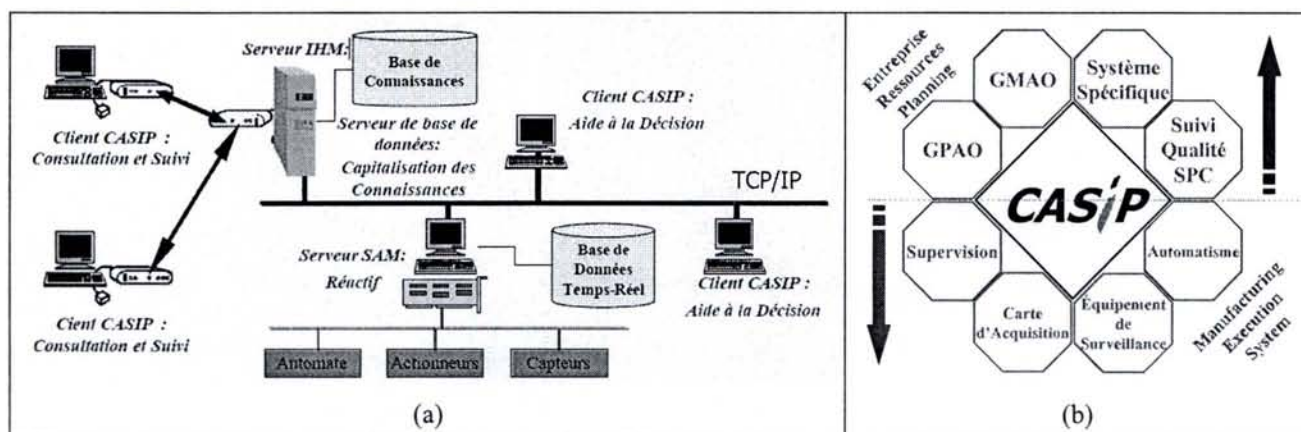


Figure 74 - Architecture de la plate-forme de télémaintenance CASIP

⁹⁸ Produit commercialisé par la société Indus international (<http://www.indus.fr>).

2.3.1.2. Intégration au niveau management

Même si la plate-forme TELMA n'est pas encore reliée au progiciel de gestion intégré (ERP) de l'AIPL⁹⁹ ou à un système de pilotage de la production (MES), CASIP est une solution ouverte (Figure 74b) qui offre la perspective d'un interfaçage, voire d'une intégration, du SI de maintenance avec des outils de ce type (§I.3.1.1.3).

Actuellement, l'intégration de la maintenance au niveau management se fait donc exclusivement avec le progiciel de GMAO Empacix dont le rôle se limite pour l'instant à une gestion de la logistique de maintenance. Les informations communiquées par CASIP à Empacix doivent permettre de programmer des interventions conditionnelles non prévues dans le plan préventif basé sur un calendrier, de s'assurer que les ressources humaines et techniques sont disponibles pour intervenir, de mettre à jour le planning de maintenance en fonction des interventions conditionnelles réalisées, d'enrichir la base de connaissances de la maintenance...

Réciproquement, les informations extraites d'Empacix doivent permettre de tenir compte des interventions de maintenance déjà réalisées, de leur date, du rapport d'intervention afin d'élaborer un diagnostic pertinent et une prévision de l'évolution du dysfonctionnement.

2.3.2. Un SI de maintenance coopératif

La base de connaissances et la base de données Temps réel de CASIP sont exploitables localement et à distance, ce qui offre des opportunités de télémaintenance, de maintenance coopérative et distribuée (§I.3.1).

Basée sur les TIC, l'architecture CASIP autorise des experts distants (disposant d'un accès client) à visualiser l'ensemble des indicateurs, des variables et des historiques de la plate-forme TELMA. De plus, un module de communication permet aux utilisateurs connectés simultanément de dialoguer en temps réel. En cas d'apparition d'une dérive de fonctionnement de la plate-forme, CASIP offre ainsi l'opportunité à chaque collaborateur de donner son avis sur la cause du problème et sur la façon de le résoudre.

De là, la conception future d'un protocole de négociation [Yu *et al.*, 2003] permettra de mettre en place un processus décisionnel collaboratif débouchant sur le lancement éventuel d'interventions de maintenance sur la plate-forme.

2.4. Application proposée

Afin de montrer la faisabilité de la méthodologie proposée, aussi bien d'un point de vue "construction des modèles" que d'un point de vue "implémentation du processus sur une architecture opérationnelle", nous allons développer puis mettre en œuvre le processus de pronostic sur le *processus de poinçonnage* du système de *Déroulage / Pressage* (Figure 75).

⁹⁹ Progiciel de gestion intégré Adonix (<http://www.adonix.fr/index.htm>)

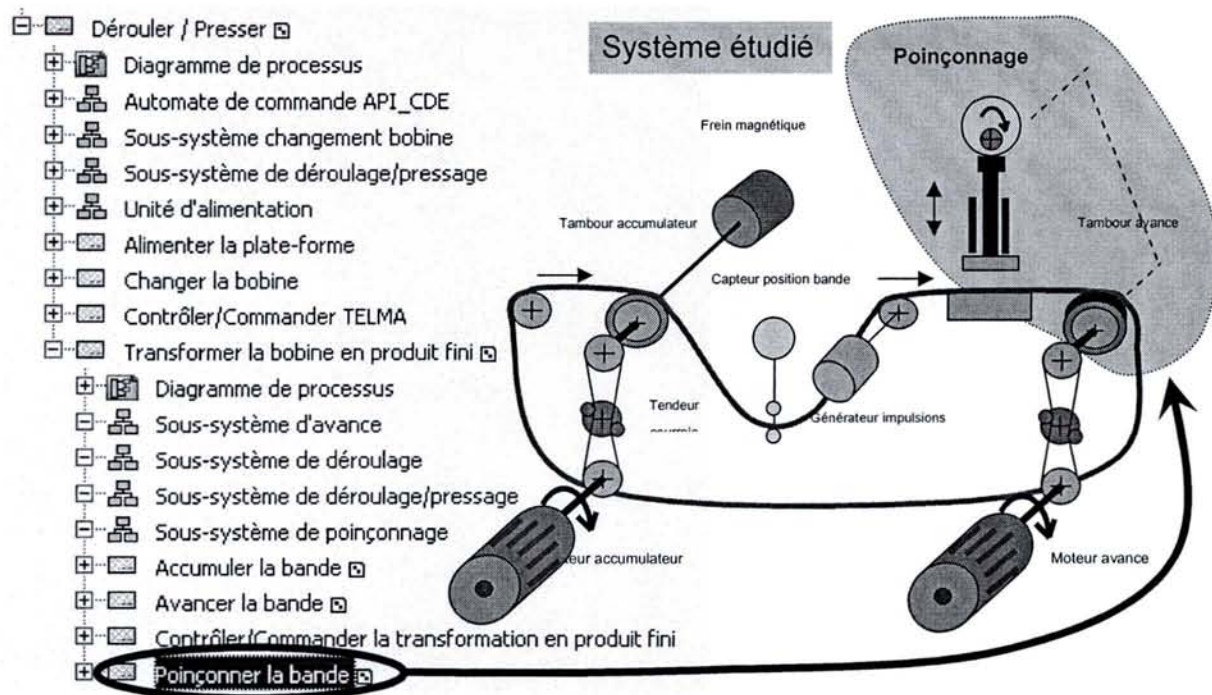


Figure 75 - Schéma de principe du système de Déroulage / Pressage

Remarque : cependant, le processus de pronostic a été développé sur le système global de Déroulage / Pressage ; les modèles résultant de la mise en œuvre de la méthodologie sur le *système de Déroulage / Pressage* sont également disponibles (modèle processus, modèle événementiel, modèle probabiliste).

3. Formalisation des connaissances nécessaires à l'élaboration du modèle probabiliste

Conformément à la méthodologie décrite au chapitre III, la première étape de modélisation a pour objectif d'extraire, puis de formaliser la connaissance permettant de construire le modèle probabiliste du système de Déroulage / Pressage.

3.1. Modélisation du fonctionnement du système de Déroulage / Pressage

3.1.1. Analyse fonctionnelle

Le système de Déroulage / Pressage supporte un des quatre processus majeurs de la plate-forme TELMA au niveau d'abstraction le plus élevé (N) (Figure 76).

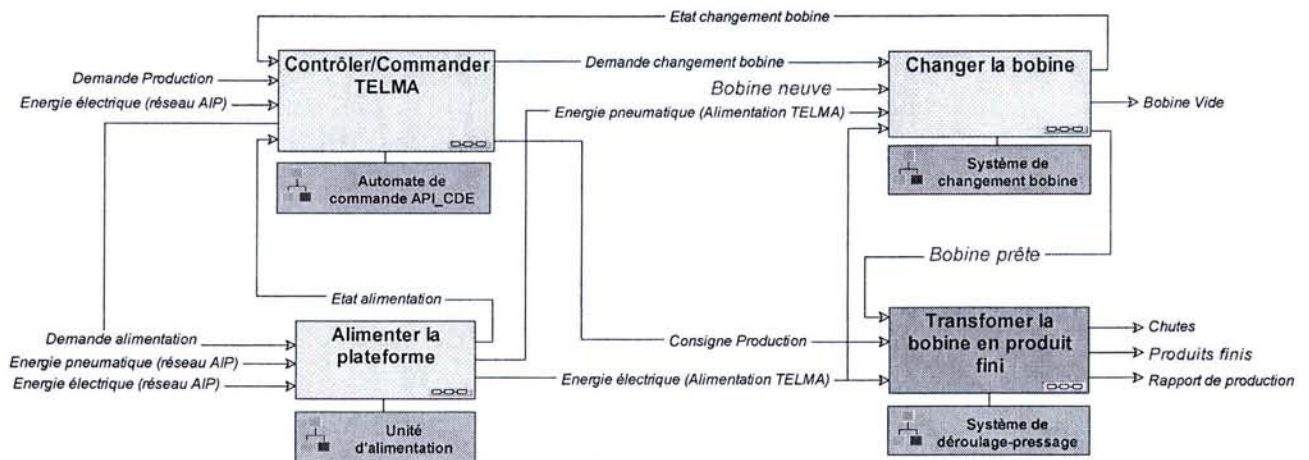


Figure 76 - Modèle processus de la plate-forme TELMA au niveau d'abstraction le plus élevé (N)

Ce processus "Transformer la bobine en produit fini" est défini par :

- **Finalité** : Fournir les produits finis correspondant à la consigne de production délivrée.
- **Fonction** : Transformer la bobine en produits répondant aux caractéristiques demandées.
- **Support** : Système de Déroulage / Pressage.

En vertu des concepts introduits au §III.4.1.1, la performance du processus *Transformer la bobine en produits finis* s'évalue sur les attributs de ses flux produits, c'est-à-dire sur les propriétés des flux *Produits finis* et *Chutes*.

Par conséquent, la mission du processus de pronostic est d'estimer l'état des propriétés des flux *Produits finis* et *Chutes* à l'instant $t + \Delta t$, à partir d'une observation de la situation courante du système de Déroulage / Pressage à l'instant t et en tenant compte des interventions de maintenance planifiées au cours de la période $[t, t + \Delta t]$.

Transformer la bobine en produit fini (Niveau N-1)

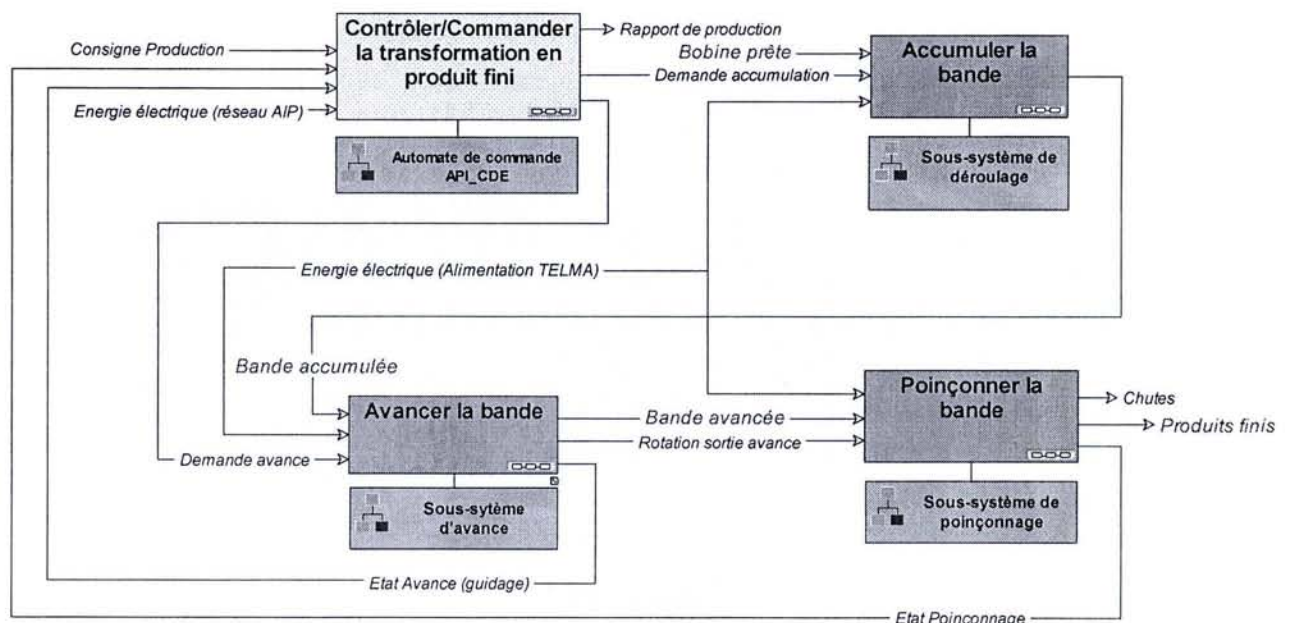


Figure 77 - Décomposition du processus principal (N-1)

La décomposition du système de Déroulage / Pressage en processus est menée de manière descendante. Le processus principal est ainsi décomposé en sous-processus transformateurs de flux jusqu'à atteindre les processus de niveau élémentaire. Au niveau d'abstraction N-1 (Figure 77), trois des quatre processus présents ne sont pas élémentaires et à ce titre, ils doivent être décomposés à leur tour.

Afin d'améliorer la lisibilité du document, nous allons présenter la mise en œuvre de la méthodologie proposée sur un seul processus : *Poinçonner la bande* (Figure 78).

Poinçonner la bande (Niveau N-2)

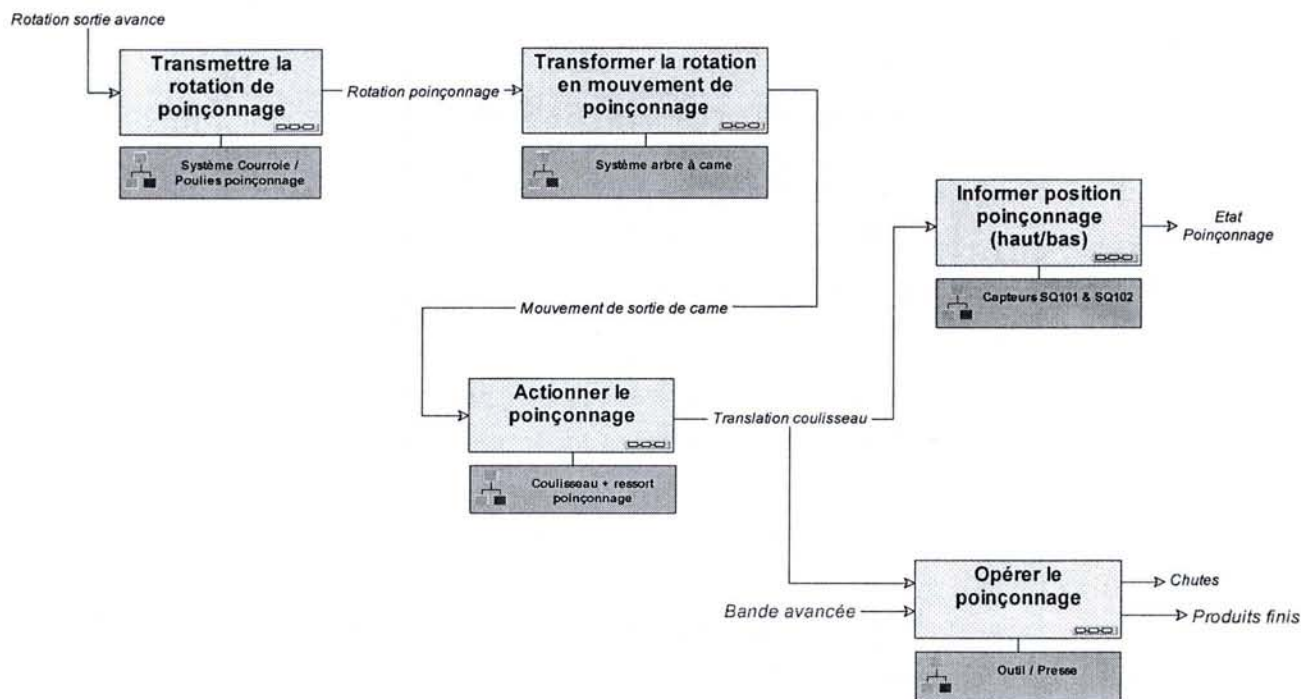


Figure 78 - Décomposition du processus de poinçonnage (N-2)

Le processus *Poinçonner la bande* exploite la *rotation sortie d'avance* produite par le processus *d'avance* via une courroie trapézoïdale qui entraîne un arbre à came en rotation permettant le mouvement de translation du coulisseau (Figure 79). Deux ressorts permettent au poinçon, guidé en translation, de rester en contact avec les cames.

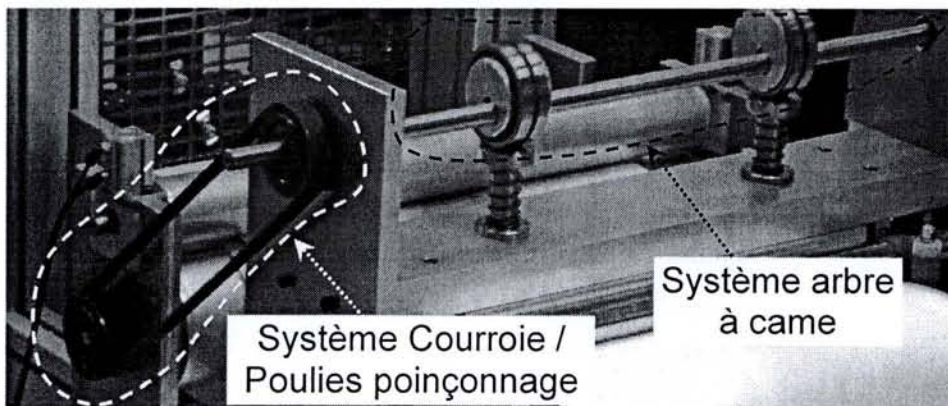


Figure 79 - Description du sous-système de poinçonnage

3.1.2. Analyse dysfonctionnelle

La décomposition de la plate-forme extraite de l'analyse processus précédente est utilisée comme base commune des études dysfonctionnelles AMDEC et HAZOP. De façon complémentaire, l'AMDEC définit les modes de dégradation des supports de processus alors que l'HAZOP définit les flux et leurs attributs (Figure 80).

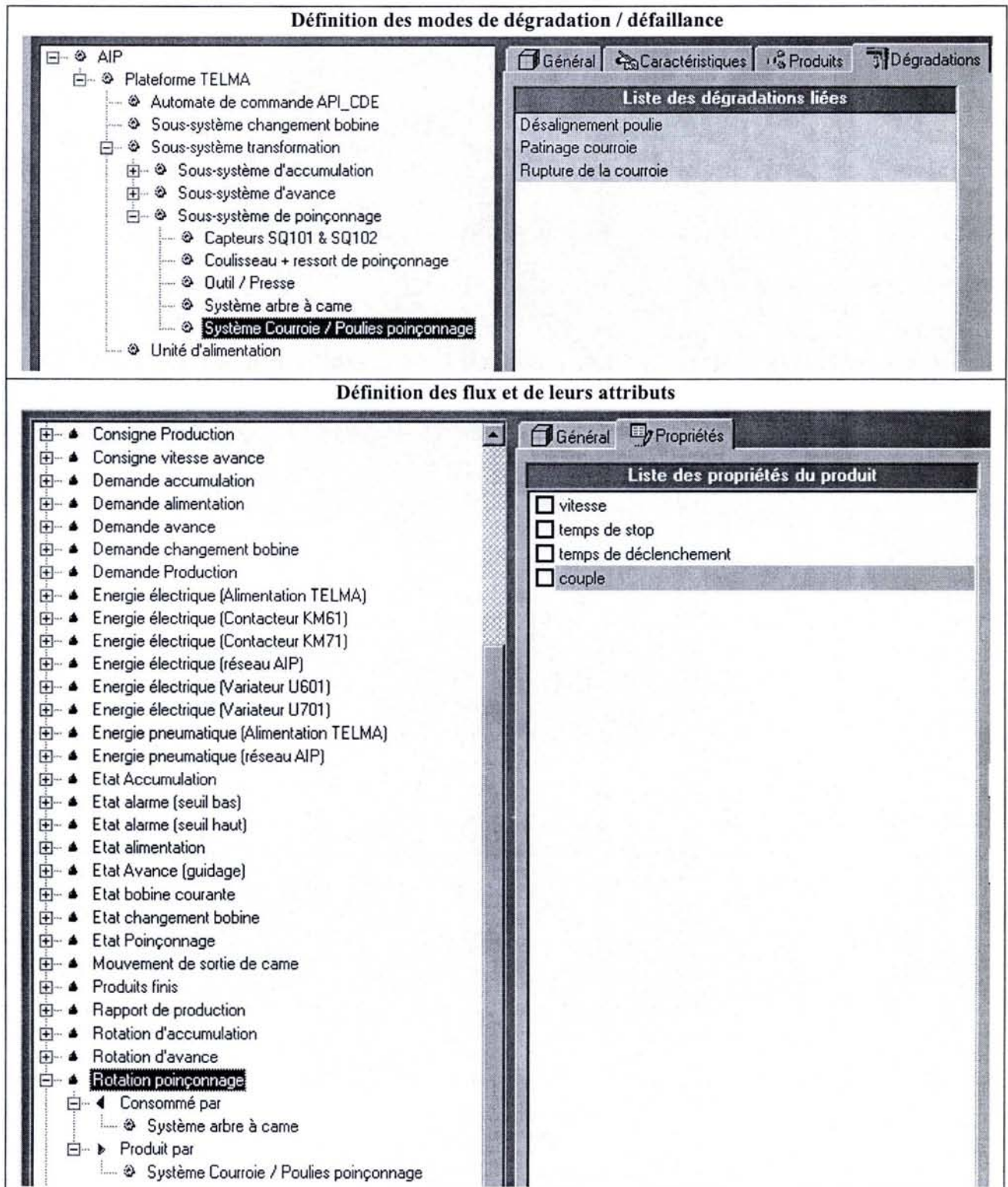


Figure 80 - Analyse préliminaire aux études AMDEC et HAZOP

Remarque : les attributs "temps de déclenchement" et "temps de stop" du flux *Rotation arbre poinçonnage* sont des attributs temporels qui caractérisent le début et la fin de la rotation de poinçonnage attendus par le système de Déroulage / Pressage (Figure 81).

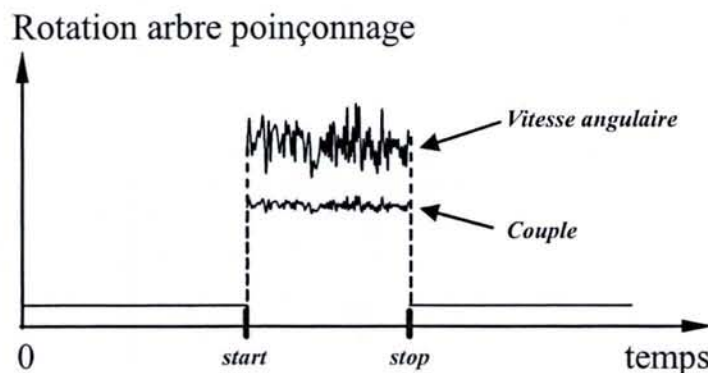


Figure 81 - Description du flux "Rotation arbre poinçonnage"

Réalisation de l'étude AMDEC

L'analyse AMDEC détermine, pour chaque support de processus, les causes et les conséquences des modes de dégradation recensés. L'apparition d'un mode de dégradation, causée par un processus de détérioration, engendre une (ou plusieurs) déviation(s) de flux. La Figure 82 présente l'extrait de l'étude AMDEC consacrée à l'analyse du système *Courroie / Poulies poinçonnage* support du processus *Transmettre la rotation de poinçonnage*.

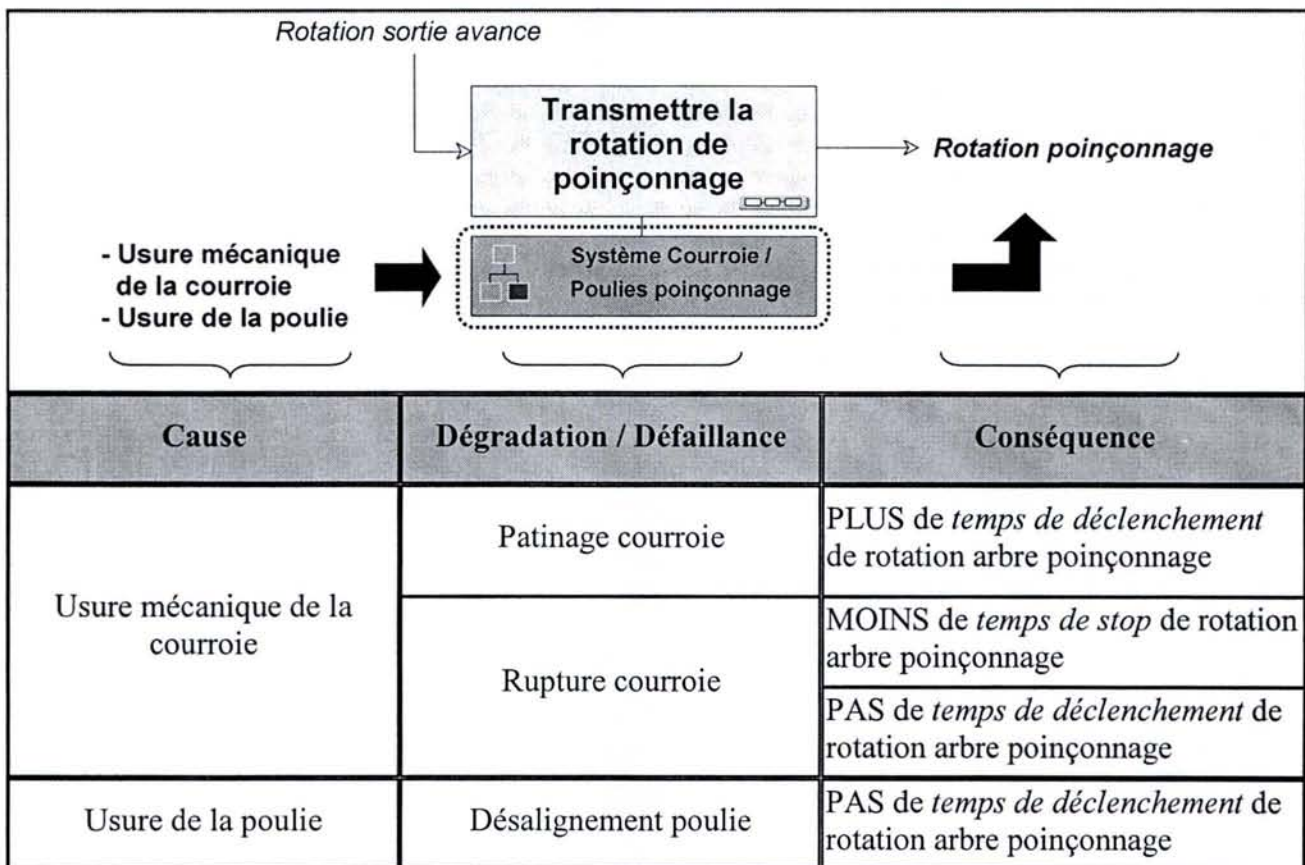


Figure 82 - Extrait de l'étude AMDEC relative au système Courroie / Poulies poinçonnage

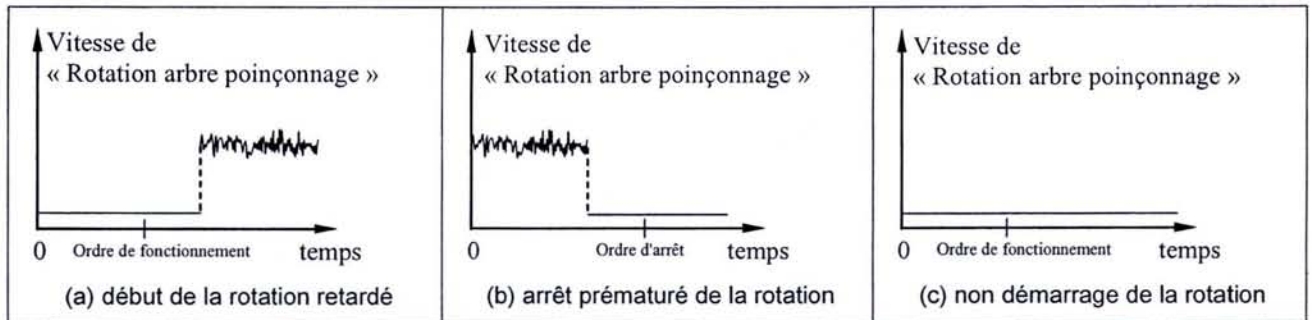


Figure 83 - Déviations engendrées par l'usure de la courroie

D'après l'analyse, le support système *Courroie / Poulies poinçonnage* est soumis à :

- Un processus d'usure mécanique de la courroie, qui conduit à l'apparition du mode de dégradation "Patinage courroie" ou/puis à l'apparition du mode de défaillance "Rupture courroie". Ce processus de détérioration engendre (Figure 83) :
 - en cas de patinage, la déviation PLUS de "temps de déclenchement" du flux *Rotation arbre poinçonnage* (a),
 - en cas de rupture, la déviation MOINS de "temps de stop" du flux *Rotation arbre poinçonnage* (b) ou la déviation PAS de "temps de déclenchement" du flux *Rotation arbre poinçonnage* (c).
- Un processus d'usure de la poulie, qui conduit à l'apparition du mode de dégradation "Désalignement poulie". Ce processus de détérioration engendre aussi la déviation PAS de "temps de déclenchement" du flux *Rotation arbre poinçonnage* (c).

Réalisation de l'étude HAZOP

La grille HAZOP détermine, pour l'ensemble des flux produits par un processus, les causes et les conséquences des déviations de leurs attributs.

L'apparition d'une déviation d'un attribut de flux produit est due à la déviation du flux consommé par le processus ou bien à l'occurrence d'un mode de dégradation/défaillance de son support (cause). Cette déviation d'un attribut de flux produit engendre la déviation d'un ou plusieurs flux produits par le(s) processus qui consomme(nt) le flux concerné (conséquences).

La Figure 84 présente l'extrait de l'étude HAZOP consacrée à l'étude du flux *Rotation poinçonnage* produit par le processus *Transmettre la rotation de poinçonnage*. On y retrouve les attributs de temps : "temps de déclenchement" et "temps de stop" déjà évoqués dans l'étude AMDEC, auxquels on ajoute les attributs de forme : "vitesse" et "couple" de la rotation, susceptibles de subir des déviations de type MOINS ou PLUS.

D'après le principe de causalité (§III.4.1.2), les causes de ces déviations sont les modes de dégradation / défaillance du système *Courroie / Poulies poinçonnage* support du processus *Transmettre la rotation de poinçonnage*, ou les déviations du flux *Rotation sortie avance* consommé par ce même processus.

De même, les effets des déviations du flux *Rotation sortie poinçonnage* se mesurent sur les attributs du flux *Mouvement de sortie de came* produit par le processus *Transformer la rotation en mouvement de poinçonnage* situé en aval du processus étudié.

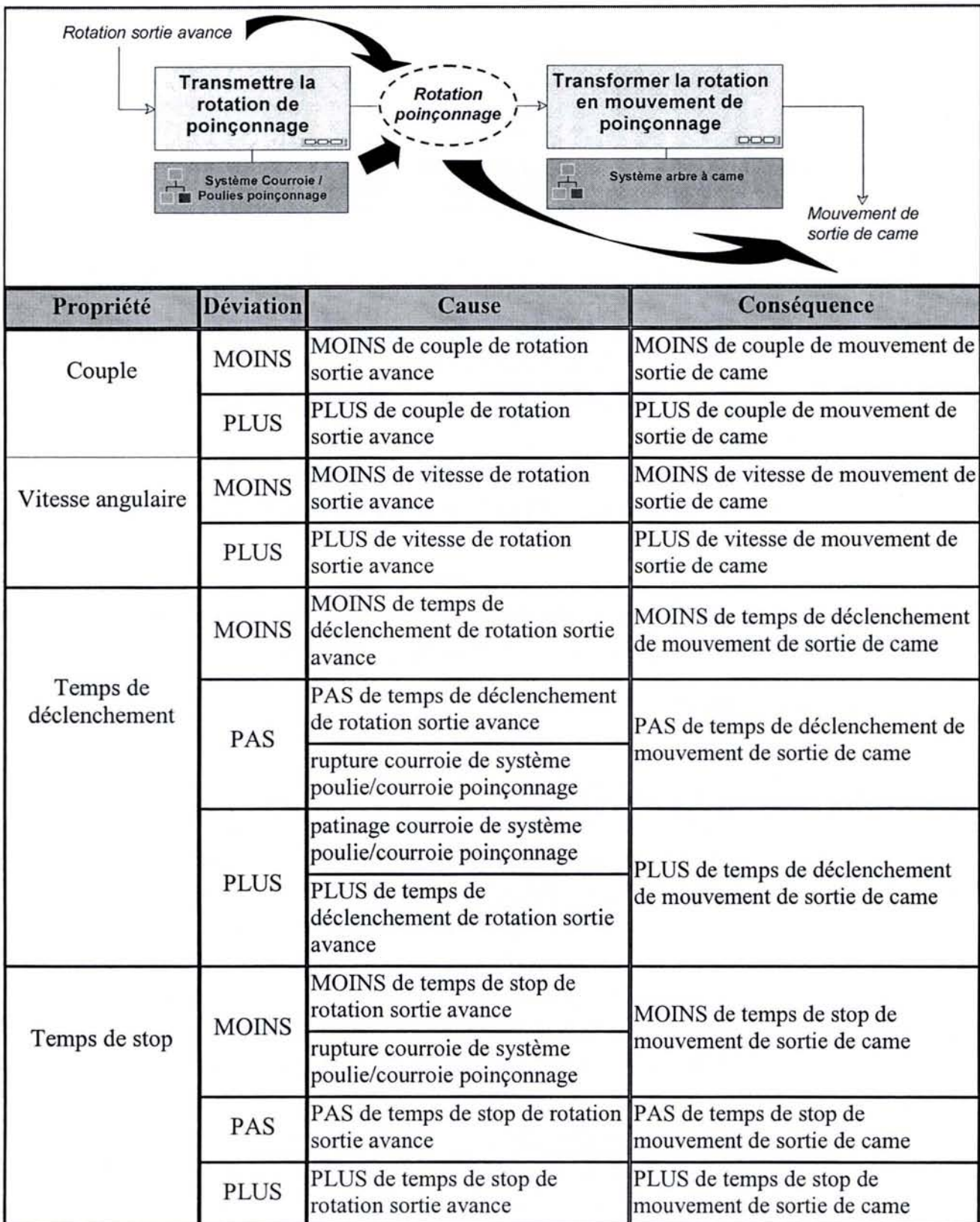


Figure 84 - Extrait de l'étude HAZOP relative au flux "Rotation arbre poinçonnage"

3.1.3. Modélisation causale du fonctionnement

À partir des résultats obtenus dans les deux étapes précédentes, il s'agit maintenant de formaliser les modes de fonctionnement nominaux à partir du modèle processus et les modes de fonctionnement dégradés ou défaillants à partir des études AMDEC et HAZOP.

3.1.3.1. Modélisation du fonctionnement nominal du système

Cette étape consiste à supprimer les cycles présents dans le modèle processus, suivant la procédure définie dans le §III.4.1.3.1, afin d'éviter tout problème de causalité dans la suite de la démarche. Il existe un motif cyclique dans le modèle processus *Poinçonner la bande* causé par le flux *Translation coulisseau* (Figure 85).

La spécification du "cycle de production"¹⁰⁰ associé au flux *Translation coulisseau* permet de l'éliminer.

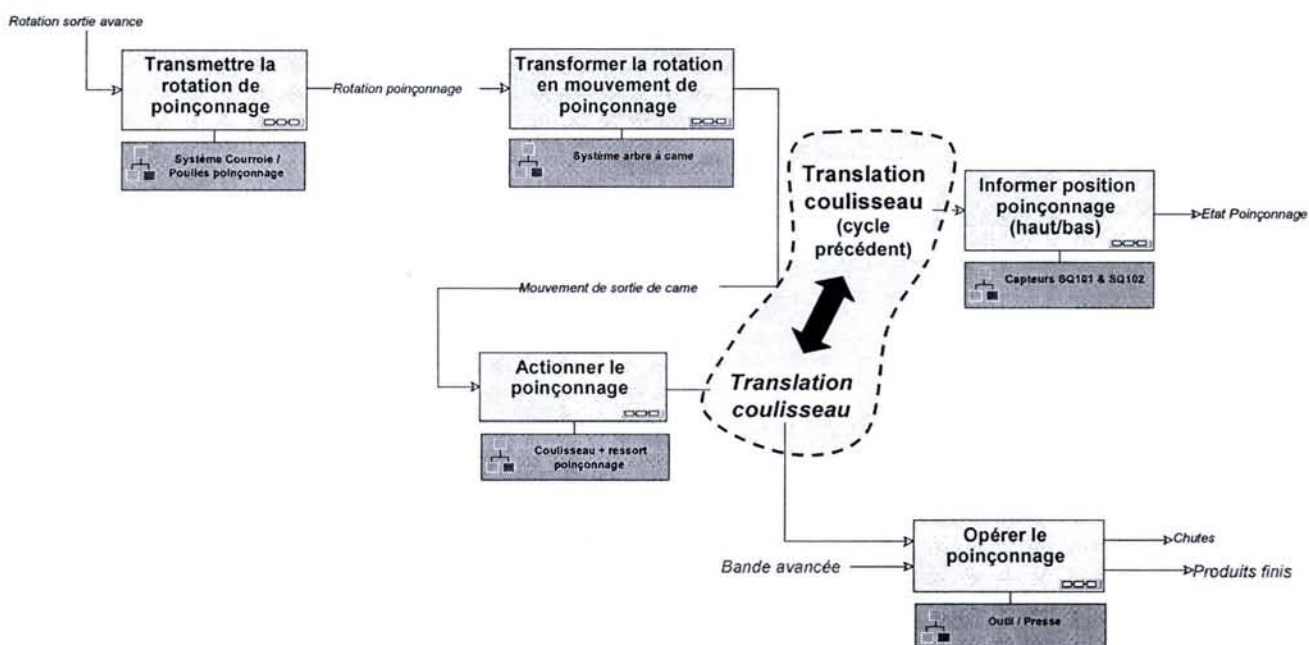


Figure 85 - Intégration de la spécification du cycle de production du flux Translation coulisseau

3.1.3.2. Modélisation du fonctionnement non nominal du système

L'exploitation du formalisme des RBD permet de s'affranchir de la traduction des relations causales issues des analyses AMDEC et HAZOP. Par conséquent, il n'est pas utile de procéder à la traduction de ces relations sous forme d'équations causales.

¹⁰⁰ Afin de ne pas surcharger le modèle processus, la spécification du "cycle de production" n'est visible que sur les flux adoptant la modalité "cycle précédent". Un flux sans spécification adopte par défaut "cycle courant".

3.2. Modélisation dynamique du système de Déroulage / Pressage

La modélisation dynamique des processus *Transmettre la rotation de poinçonnage* et *Transformer la rotation en mouvement de poinçonnage* illustre successivement les situations de dépendance et d'indépendance stochastiques présentées au §III.4.2.2 (Figure 86).

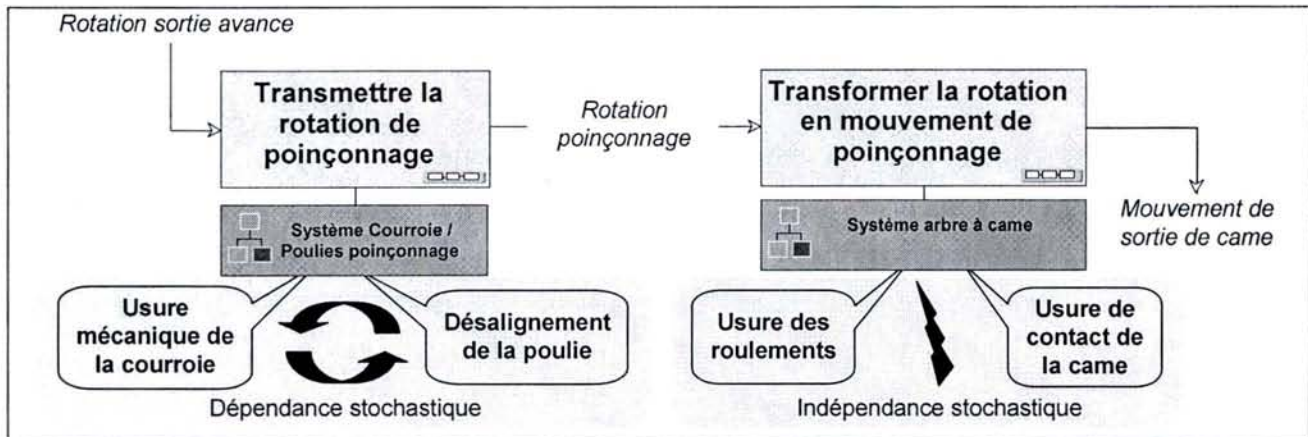


Figure 86 - Exemple de dépendance et d'indépendance stochastiques

Modélisation du Système arbre à came (cas d'indépendance stochastique)

Le système *arbre à came* est soumis à deux mécanismes de détérioration "Usure des roulements" et "Usure de contact de la came", supposés indépendants.

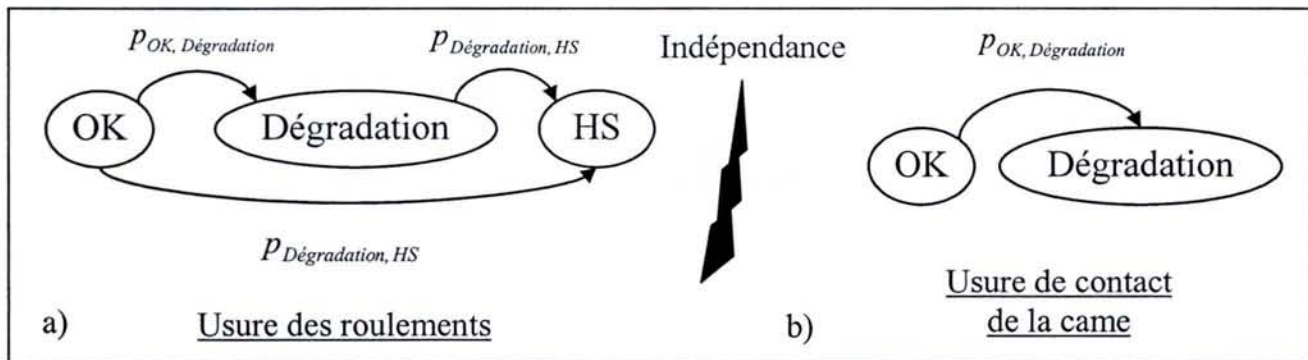


Figure 87 - Représentation des processus de détérioration du support système arbre à came

Le processus d'usure des roulements est formalisé par un processus markovien $\{U_{roulements}\}$ caractérisé par (Figure 87a) :

- un espace d'états discrets $\chi^{U_{roulements}} = \{OK, Dégradation, HS\}$,
- une matrice de passage $P_{U_{roulements}}$ qui contient les paramètres du processus d'usure des roulements, les taux de transition $p_{ij}(k) = p(U_{roulements\ k} = U_j / U_{roulements\ k-1} = U_i)$.

$$P_{U_{roulements}} = \begin{bmatrix} - & P_{OK, Dégradation} & P_{OK, HS} \\ 0 & - & P_{Dégradation, HS} \\ 0 & 0 & - \end{bmatrix}$$

NB : Les termes diagonaux sont égaux à (1- la somme des autres termes de la ligne)

De même, le processus d'usure de contact de la came est formalisé par un processus markovien $\{C_{\text{came}}\}$ caractérisé par (Figure 87b) :

- un espace d'états discrets $\chi^{C_{\text{came}}} = \{\text{OK}, \text{Dégradation}\}$,
- une matrice de passage $P_{C_{\text{came}}} = \begin{bmatrix} - & P_{\text{OK}, \text{Dégradation}} \\ 0 & - \end{bmatrix}$

Modélisation du Système Courroie / Poulies poinçonnage (cas de dépendance stochastique)

Le système Courroie / Poulies poinçonnage est soumis à deux mécanismes de détérioration dépendants :

- une usure par fatigue de la courroie, formalisée par un processus markovien $\{F_{\text{courroie}}\}$ à trois états (OK, Allongement, Rupture) et trois paramètres $[p_1, p_2, p_3]$,

un mécanisme de désalignement de la poulie, formalisé par un processus markovien $\{D_{\text{poulie}}\}$ à trois états (OK, Désalignement léger, Désalignement fort) et deux paramètres $[p_4, p_5]$ (Figure 88).

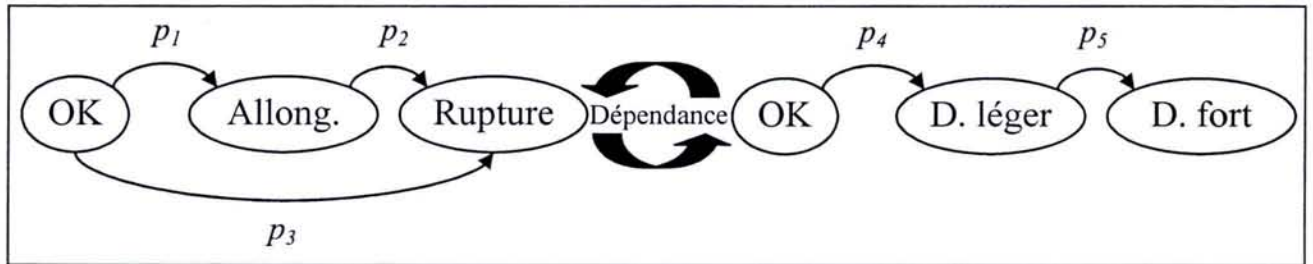


Figure 88 - Formalisation des processus de détérioration du système Courroie / Poulies poinçonnage

La dépendance stochastique des deux processus est définie de la manière suivante :

- Lorsque la poulie atteint l'état Désalignement léger, l'usure de la courroie est accélérée. Les paramètres $[p_1, p_2, p_3]$ sont alors remplacés par les paramètres $[p'_1, p'_2, p'_3]$ ($p'_i > p_i \forall i$).
- Lorsque la poulie atteint l'état de Désalignement fort, la courroie saute et la transmission de la rotation est rompue. Le système Courroie / Poulies poinçonnage est alors défaillant.

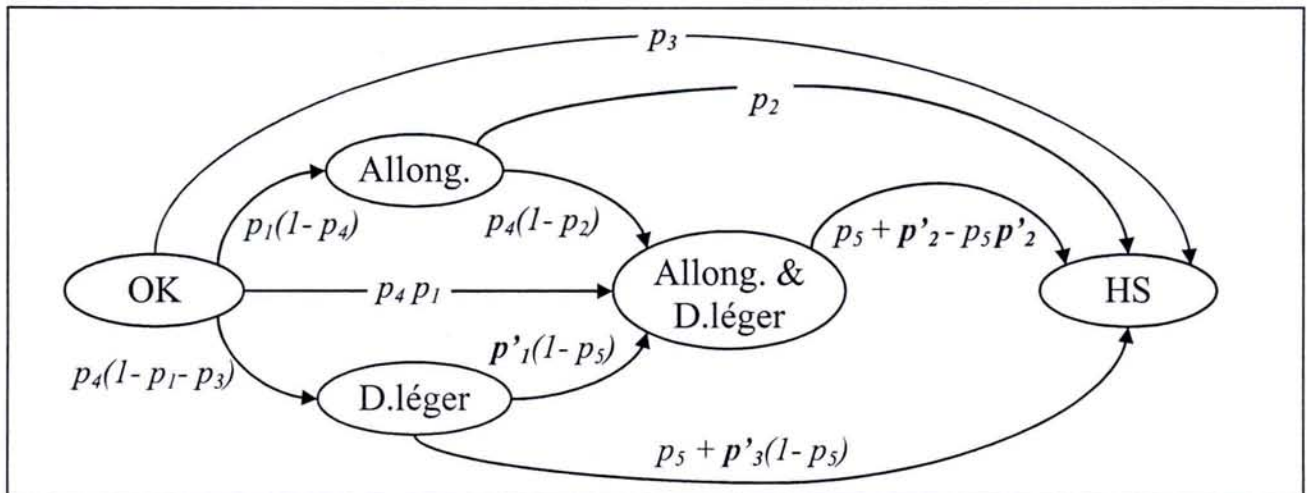


Figure 89 - Agrégation des processus stochastiquement dépendants $\{F_{\text{courroie}}\}$ et $\{D_{\text{poulie}}\}$

Le mécanisme d'agrégation des processus de détérioration $\{F_{\text{courroie}}\}$ et $\{D_{\text{poulie}}\}$ débouche sur la création d'un "macro-processus" $\{FD_{\text{poinçonnage}}\}$ (Figure 89), caractérisé par :

- un espace d'état $\chi^{FD_{\text{poinçonnage}}}$ composé,
 - d'un état nominal : OK,
 - d'un état dégradé avec allongement de la courroie seul : Allong.,
 - d'un état dégradé avec désalignement léger de la poulie seul : D.léger,
 - d'un état de présence simultanée des deux dégradations : Allong. & D.léger,
 - d'un macro-état défaillant : HS.

Les paramètres d'évolution du processus $\{FD_{\text{poinçonnage}}\}$ sont déterminés à partir de l'équation (26).

On obtient en définitive la matrice de transition suivante :

$$\mathbf{P}_{FD_{\text{poinçonnage}}} = \begin{bmatrix} - & p_1(1-p_4) & p_4(1-p_1-p_3) & p_1p_4 & p_3 \\ 0 & - & 0 & p_4(1-p_2) & p_2 \\ 0 & 0 & - & p'_1(1-p_5) & p_5 + p'_3(1-p_5) \\ 0 & 0 & 0 & - & p_5 + p'_2 - p_5 p'_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & - \end{bmatrix}$$

NB : Les termes diagonaux sont égaux à (1- la somme des autres termes de la ligne)

Rappel : les paramètres des processus de détérioration seront déterminés lors de la création du modèle probabiliste à partir de l'exploitation de connaissances expertes ou par apprentissage sur des données de retour d'expérience (procédure décrite au §III.5.3.4).

4. Élaboration du modèle probabiliste

Nous allons illustrer l'élaboration du modèle probabiliste du Système de Déroulage / Pressage en détaillant, étape par étape, la conversion du processus *Poinçonner la bande* de niveau N-2 (Figure 78).

4.1. Identification des variables du RBD

Le RBD modélisant le comportement du processus *Poinçonner la bande* comporte six variables dynamiques représentant les processus de détérioration identifiés lors de l'étape précédente (Figure 90). Les variables statiques du réseau sont associées aux attributs des flux.

Exemples :

- Le processus $\{U_{roulements}\}$ associé à la variable dynamique $U_{roulements}$ est représenté par les deux nœuds **U roulements [k-1]** et **U roulements**.
- Le flux *Rotation poinçonnage* est représenté par quatre nœuds associés à ses attributs : **Rotation poinçonnage.Start**, **Rotation poinçonnage.Stop**, **Rotation poinçonnage.Couple** et **Rotation poinçonnage.Vitesse**.

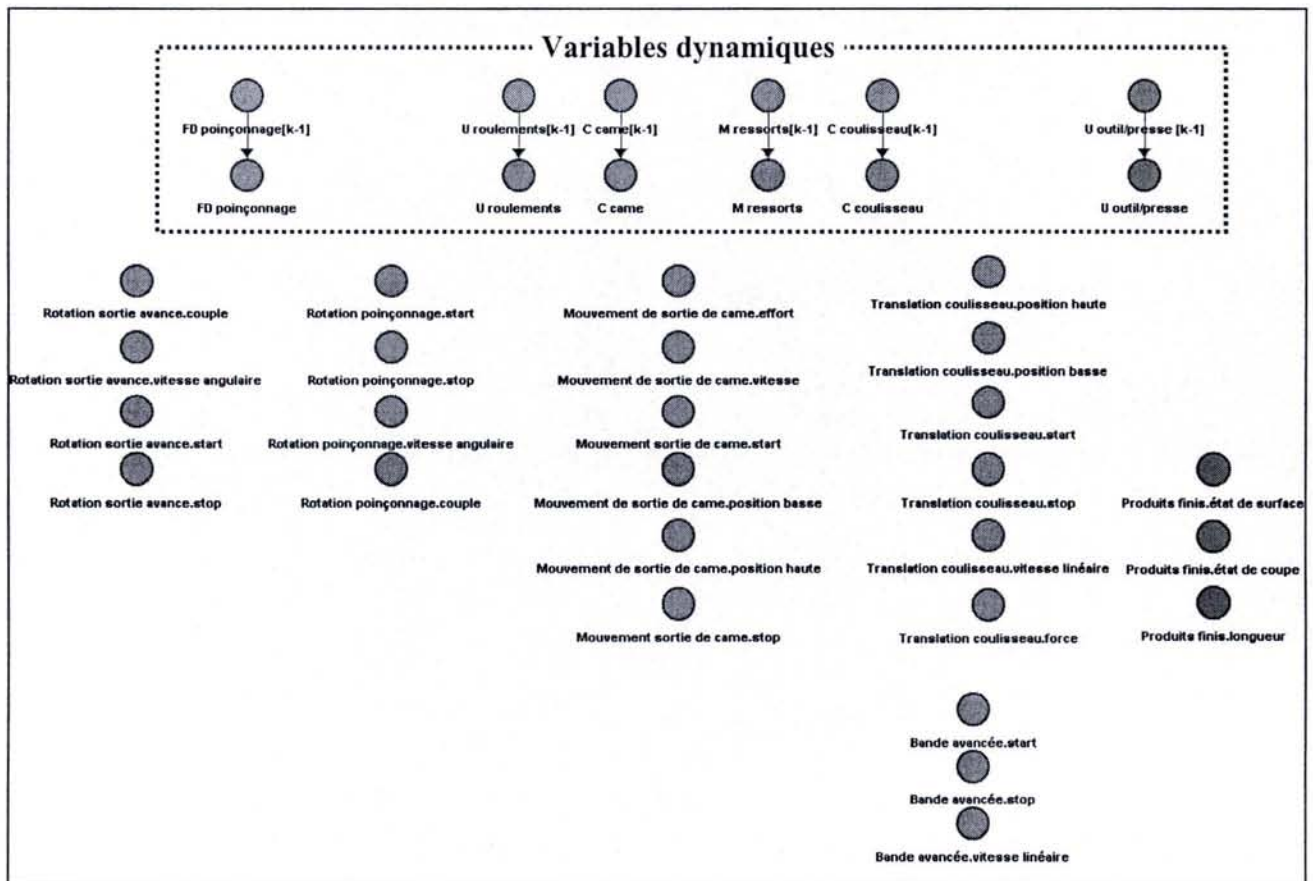


Figure 90 - Variables liées au processus "Poinçonner la bande"

Remarque : nous n'avons pas intégré, dans cette vue du processus *Poinçonner la bande*, le sous-processus *Informer position poinçonnage (haut/bas)*.

4.2. Elaboration de la structure

La structure du RBD modélisant le comportement du processus *Poinçonner la bande* (Figure 91) est établie automatiquement à partir des relations causales formalisées dans le modèle processus et dans les analyses dysfonctionnelles AMDEC et HAZOP.

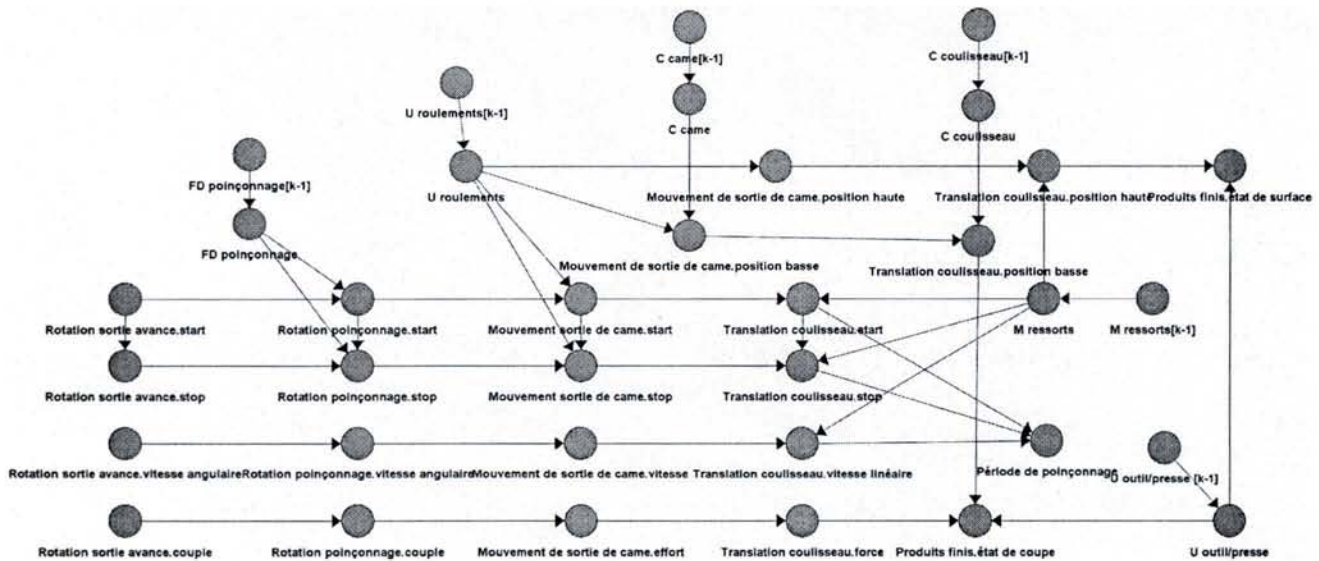


Figure 91 - Structure du RBD du processus "Poinçonner la bande"

Exemples :

- Les relations causales : MOINS de Couple de Rotation sortie avance → MOINS de Couple de Rotation poinçonnage et PLUS de Couple de Rotation sortie avance → PLUS de Couple de Rotation poinçonnage engendrent la création de l'arc $[A_1]$ (Figure 92).
- De même, la relation causale : Rupture de la Courroie du Système Courroie / Poulies poinçonnage → PAS de Start de Rotation poinçonnage engendre la création de l'arc $[A_2]$.

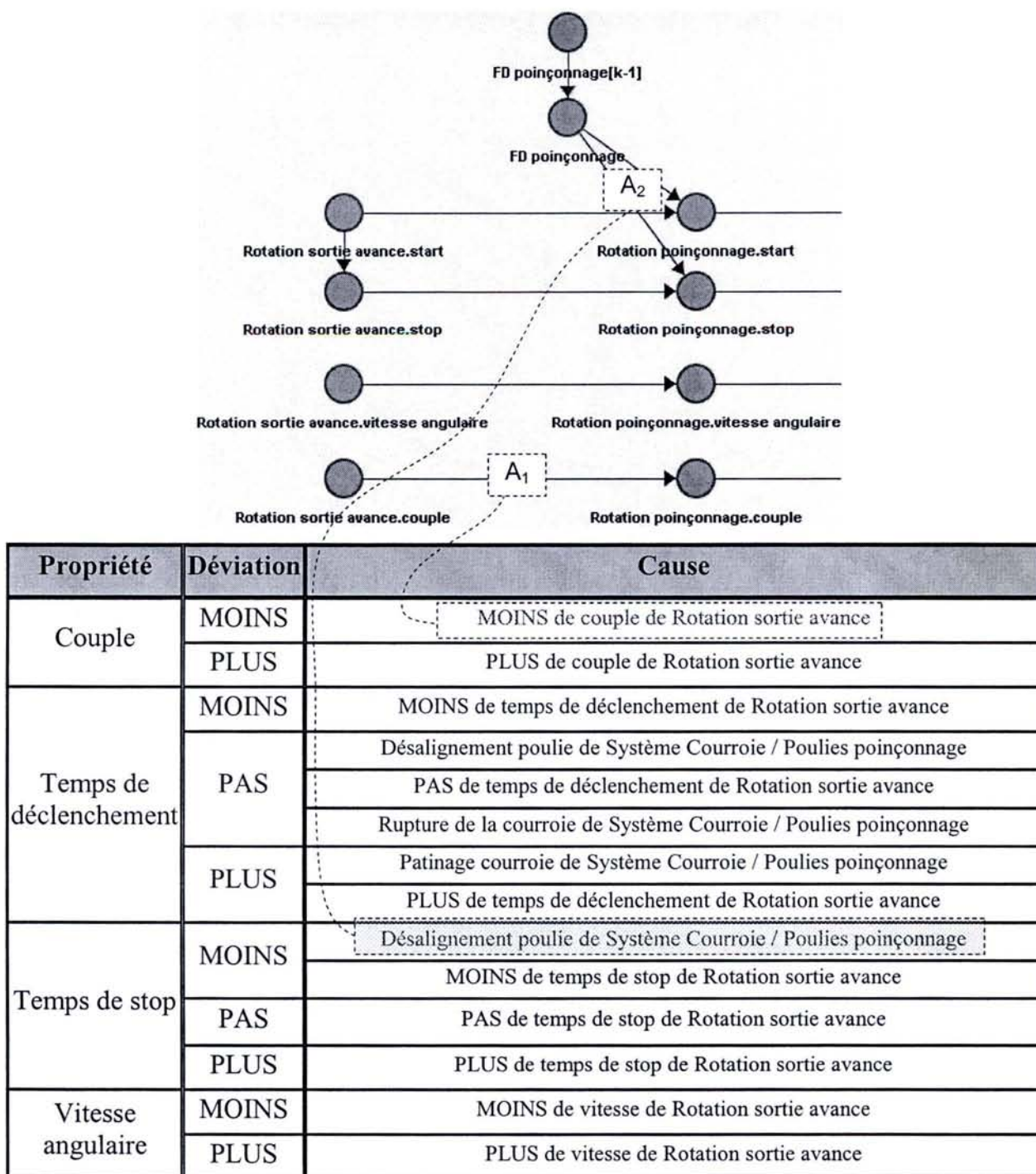


Figure 92 - Construction de la structure du RBD

4.3. Définition des états des variables statiques

Contrairement aux variables dynamiques discrétisées lors de l'étape précédente (par exemple, *FD poinçonnage*), les états des variables statiques doivent être définis à ce stade de construction du modèle probabiliste.

Exemple : la variable *Rotation poinçonnage.start* est une variable quantitative dont l'espace d'états $\chi^{\text{Rotation.poinçonnage.start}}$ est déterminé à partir des espaces d'états de ses parents : $\chi^{\text{Rotation.avance.start}} =]-1,5 ; 1,5]$ et $\chi^{\text{FD poinçonnage}} = \{\text{OK, Allong., D.léger, Allong. \& D.léger, HS}\}$.

Le déclenchement du mouvement de rotation poinçonnage (*Rotation.poinçonnage.start*) résulte logiquement du déclenchement du mouvement de rotation sortie avance (*Rotation sortie avance.start*). Cependant, la détérioration du processus $\{\text{FD}_{\text{courroie}}\}$ est susceptible de provoquer le retard ou bien l'absence du déclenchement (Tableau 9).

▪ $\text{FD}_{\text{poinçonnage}} = \text{OK}$	$\Leftrightarrow$	Start = Rotation sortie avance.start
▪ $\text{FD}_{\text{poinçonnage}} = \text{Allong.}$	$\Leftrightarrow$	Start = Rotation sortie avance.start + 0,5
▪ $\text{FD}_{\text{poinçonnage}} = \text{D.léger}$	$\Leftrightarrow$	Start = Rotation sortie avance.start
▪ $\text{FD}_{\text{poinçonnage}} = \text{Allong. \& D.léger}$	$\Leftrightarrow$	Start = Rotation sortie avance.start + 1
▪ $\text{FD}_{\text{poinçonnage}} = \text{HS}$	$\Leftrightarrow$	PAS de Start

Tableau 9 - Impact de $\{\text{FD}_{\text{courroie}}\}$ sur *Rotation.poinçonnage.start*

Sachant que $\chi^{\text{Rotation.avance.start}} =]-1,5 ; 1,5]$, la variable *Rotation.poinçonnage.start* peut donc prendre une valeur dans l'intervalle $] -1,5 ; 2,5]$ ou alors être dans l'état spécifique "PAS" correspondant à l'absence de rotation de poinçonnage.

En discrétisant l'intervalle $] -1,5 ; 2,5]$ et en lui ajoutant l'état "PAS", on obtient un espace d'état $\chi^{\text{Rotation.poinçonnage.start}} = \{-1 ; 0 ; 1 ; 2 ; \text{PAS}\}$ décrit par le tableau suivant :

▪ $\text{Rotation.poinçonnage.start} = -1$	$\Leftrightarrow$	$-1,5 < \text{Start} \leq -0,5$
▪ $\text{Rotation.poinçonnage.start} = 0$	$\Leftrightarrow$	$-0,5 < \text{Start} \leq 0,5$
▪ $\text{Rotation.poinçonnage.start} = 1$	$\Leftrightarrow$	$0,5 < \text{Start} \leq 1,5$
▪ $\text{Rotation.poinçonnage.start} = 2$	$\Leftrightarrow$	$1,5 < \text{Start} \leq 2,5$
▪ $\text{Rotation.poinçonnage.start} = \text{PAS}$	$\Leftrightarrow$	$2,5 < \text{Start} \leq 1000$

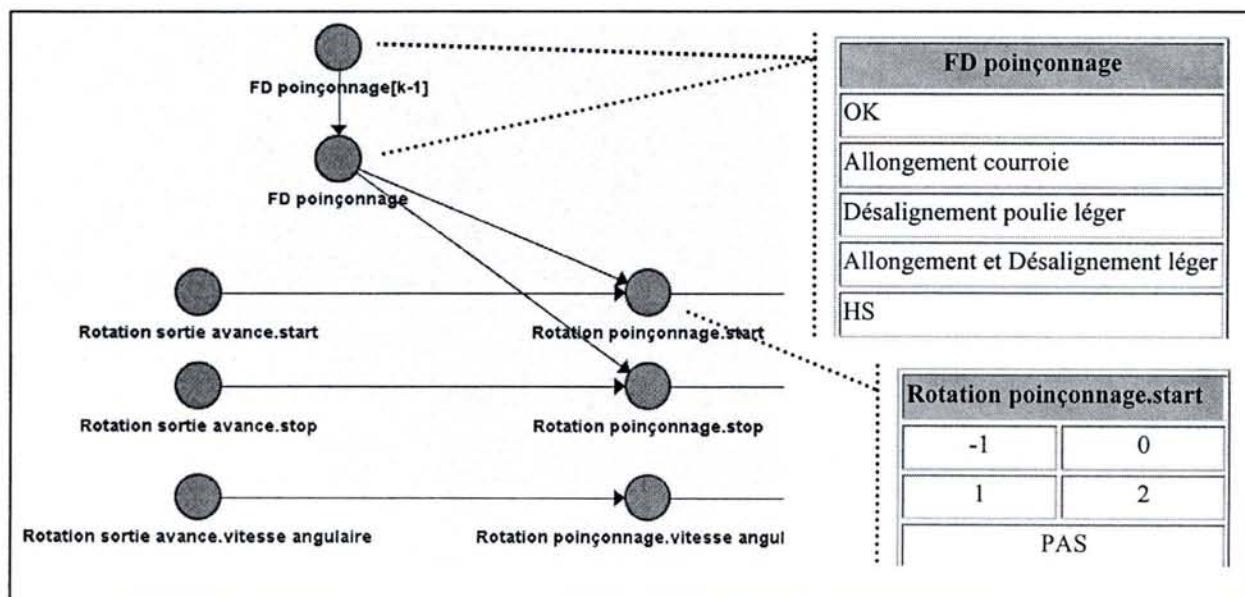


Figure 93 - Définition des états des variables liées au processus *Poinçonner la bande*

4.4. Détermination des paramètres

La quantité de données de retour d'expérience relatives au fonctionnement du système de Déroulage / Pressage étant actuellement insuffisante, il n'est pas possible de déterminer les paramètres du RBD par apprentissage. Par conséquent, les TPC sont définies par expertise à partir d'informations fournies par les constructeurs.

4.4.1. Variables dynamiques

Cas du système d'arbre à came

L'instant d'apparition de la dégradation de la came suit une loi de Weibull de paramètres : $\beta = 5$, $\eta = 12000$ unités de temps. La TPC $\theta_{C_{came}}$ résultante est définie dans le tableau suivant :

	$C_{came\ k+1} = \text{OK}$	$C_{came\ k+1} = \text{Dégradation}$
$C_{came\ k} = \text{OK}$	$1 - \lambda(t) = 1 - \frac{5}{12000} \left(\frac{t}{12000} \right)^4$	$\lambda(t) = \frac{5}{12000} \left(\frac{t}{12000} \right)^4$
$C_{came\ k} = \text{Dégradation}$	0	1

Cas du système Courroie / Poulie Poinçonnage

Les mécanismes d'usure par fatigue de la courroie et de désalignement de la poulie sont définis par le jeu de paramètres¹⁰¹ $[p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p'_1, p'_2, p'_3]$ suivant :

Usure par fatigue de la courroie (distribution de type Erlang généralisé)	
Pas de désalignement poulie	Présence d'un désalignement poulie
▪ $p_1 = 0,026$ ▪ $p_2 = 0,026$ ▪ $p_3 = 0,047$	▪ $p'_1 = 0,100$ ▪ $p'_2 = 0,100$ ▪ $p'_3 = 0,050$
Usure par fatigue de la courroie	
▪ $p_4 = 0,003$	▪ $p_5 = 0,030$

À partir de ces données numériques, on obtient la TPC $\theta_{FD\ \text{poinçonnage}}$:

$FD_{\text{poinçonnage}\ k+1} =$	OK	Allong.	D.léger	Allong. & D.léger	HS
$FD_{\text{poinçonnage}\ k} = \text{OK}$	99,924	0,026	0,003	0,000	0,047
$FD_{\text{poinçonnage}\ k} = \text{Allong.}$	0,000	99,971	0,000	0,003	0,026
$FD_{\text{poinçonnage}\ k} = \text{D.léger}$	0,000	0,000	99,901	0,025	0,074
$FD_{\text{poinçonnage}\ k} = \text{Allong. \& D.léger}$	0,000	0,000	0,000	99,945	0,055
$FD_{\text{poinçonnage}\ k} = \text{HS}$	0,000	0,000	0,000	0,000	100,000

¹⁰¹ L'unité de temps retenue est l'heure de fonctionnement. Les paramètres s'expriment donc en h⁻¹.

4.4.2. Variables statiques

Les TPC des variables statiques sont obtenues par codage de la loi physique qui régit l'interaction d'un attribut de flux vis-à-vis de ses parents. Elles sont décrites par l'intermédiaire d'équations déterministes (Figure 94) qui spécifient la valeur de la variable en fonction de la valeur ou de l'état des variables parents.

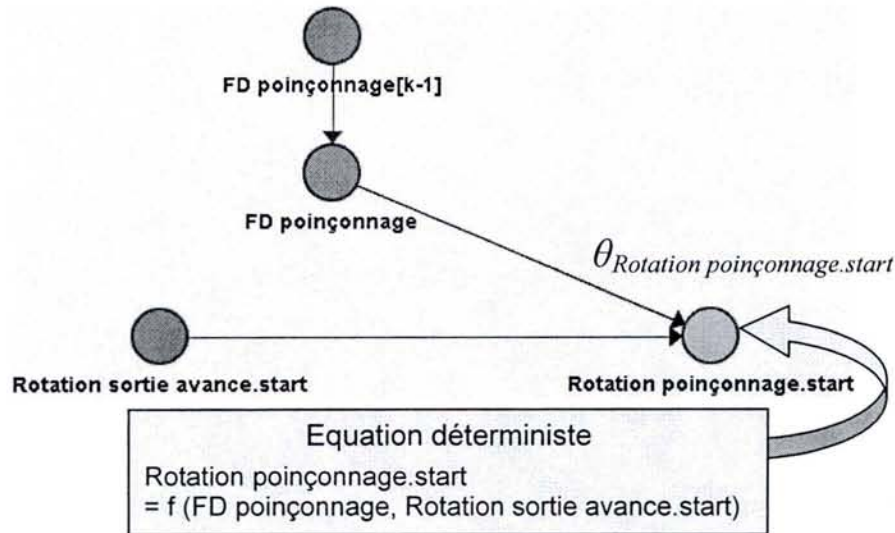


Figure 94 - Détermination de la TPC du nœud Rotation poinçonnage.start

Exemple : la description de la TPC $\theta_{Rotation \text{ poinçonnage.start}}$ est réalisée à partir de l'équation déterministe $Rotation \text{ poinçonnage.start} = f (FD \text{ poinçonnage}, Rotation \text{ sortie avance.start})$ issue du Tableau 9.

• Rotation poinçonnage.start =

Si Rotation sortie avance.start = PAS alors Rotation poinçonnage.start = PAS,
 Si FD poinçonnage = (OK ou Désalignement poulie léger)
 alors Rotation poinçonnage.start = Rotation sortie avance.start,
 Si FD poinçonnage = Allongement courroie
 alors Rotation poinçonnage.start = Rotation sortie avance.start + 0.5,
 Si FD poinçonnage = Allongement + Désalignement léger
 alors Rotation poinçonnage.start = Rotation sortie avance.start + 1,
 Sinon Rotation poinçonnage.start = PAS.

5. Construction du modèle événementiel

Le modèle événementiel joue le rôle d'interface entre le processus de pronostic et les processus de surveillance et d'aide à la décision. De ce fait, son élaboration se déroule en deux temps :

- La création de la partie du modèle relative à la connaissance de l'état présent du système de production (dégradation).
- La création de l'autre partie consacrée à l'impact des interventions envisageables sur les composants pour restaurer l'état du système (maintenance).

5.1. Modèle événementiel de la dégradation

Le modèle événementiel de la dégradation du système de Déroulage / Pressage est composé de l'ensemble des indicateurs fournis par le processus de Surveillance.

Pour le processus *Poinçonner la bande*, il s'agit :

- d'un indicateur de la période de poinçonnage représenté par une variable discrète $Z_{\text{Période poinçonnage}}$, actualisé en permanence grâce à l'instrumentation disponible sur le procédé, caractérisé par un espace d'états $\chi^{Z_{\text{Période poinçonnage}}}$:

▪ $Z_{\text{Période poinçonnage}} = -2$	$\Leftrightarrow$	$-2,5 < \text{Période poinçonnage} \leq -1,5$
▪ $Z_{\text{Période poinçonnage}} = -1$	$\Leftrightarrow$	$-1,5 < \text{Période poinçonnage} \leq -0,5$
▪ $Z_{\text{Période poinçonnage}} = 0$	$\Leftrightarrow$	$-0,5 < \text{Période poinçonnage} \leq 0,5$
▪ $Z_{\text{Période poinçonnage}} = 1$	$\Leftrightarrow$	$0,5 < \text{Période poinçonnage} \leq 1,5$
▪ $Z_{\text{Période poinçonnage}} = 2$	$\Leftrightarrow$	$1,5 < \text{Période poinçonnage} \leq 2,5$
▪ $Z_{\text{Période poinçonnage}} = \text{PAS}$	$\Leftrightarrow$	Période poinçonnage indéterminée

- d'un indicateur de défaillance de la courroie, représenté par une variable booléenne $Z_{\text{F Courroie}}$, actualisé dès qu'un opérateur va inspecter visuellement l'état du système, caractérisé par un espace d'états $\chi^{Z_{\text{F Courroie}}}$:

▪ $Z_{\text{F courroie}} = \text{OK}$	$\Leftrightarrow$	Observation d'un bon état de fonctionnement de la courroie
▪ $Z_{\text{F courroie}} = \text{Dégradé}$	$\Leftrightarrow$	Observation d'un allongement de la courroie
▪ $Z_{\text{F courroie}} = \text{HS}$	$\Leftrightarrow$	Observation d'une courroie défaillante

5.2. Modèle événementiel de la maintenance

Le modèle événementiel de la maintenance du processus *Transformer la bobine en produit fini* est composé des interventions de maintenance envisageables, d'après le processus d'aide à la décision, sur le système de Déroulage / Pressage. Les interventions peuvent être périodiques ou apériodiques.

Les interventions relatives au *Système de poinçonnage* sont listées ci-dessous :

- Remplacement de la courroie.
- Graissage des roulements.
- Remplacement des roulements.
- Equilibrage des poulies.
- Remplacements des ressorts.
- Réparation du système arbre à came.
- Réparation du coulisseau
- Affûtage de l'outil de coupe.
- Remplacement de l'outil de coupe.

Exemples :

- Le graissage des roulements est une intervention de maintenance périodique (T) représentée par la variable booléenne $G_{\text{roulements}}$, qui prend l'état Vrai lorsque le temps atteint la périodicité :

- $p(G_{\text{roulements } k} = \text{Vrai}) = 1$ si $k = Tn$ avec n entier naturel > 0 ,
- $p(G_{\text{roulements } k} = \text{Vrai}) = 0$ si $k \neq Tn$.

- Le remplacement de la courroie est une intervention de maintenance apériodique représentée par la variable booléenne RPL_{Courroie} , qui prend l'état Faux par défaut et qui passe dans l'état Vrai si l'intervention est programmée¹⁰² à une date l :

- $p(RPL_{\text{Courroie } k} = \text{Vrai}) = 1$ si $k = l$,
- $p(RPL_{\text{Courroie } k} = \text{Vrai}) = 0$ si $k \neq l$.

¹⁰² Nous supposons que la durée de l'intervention de maintenance est négligeable par rapport à l'échelle de temps de la dégradation.

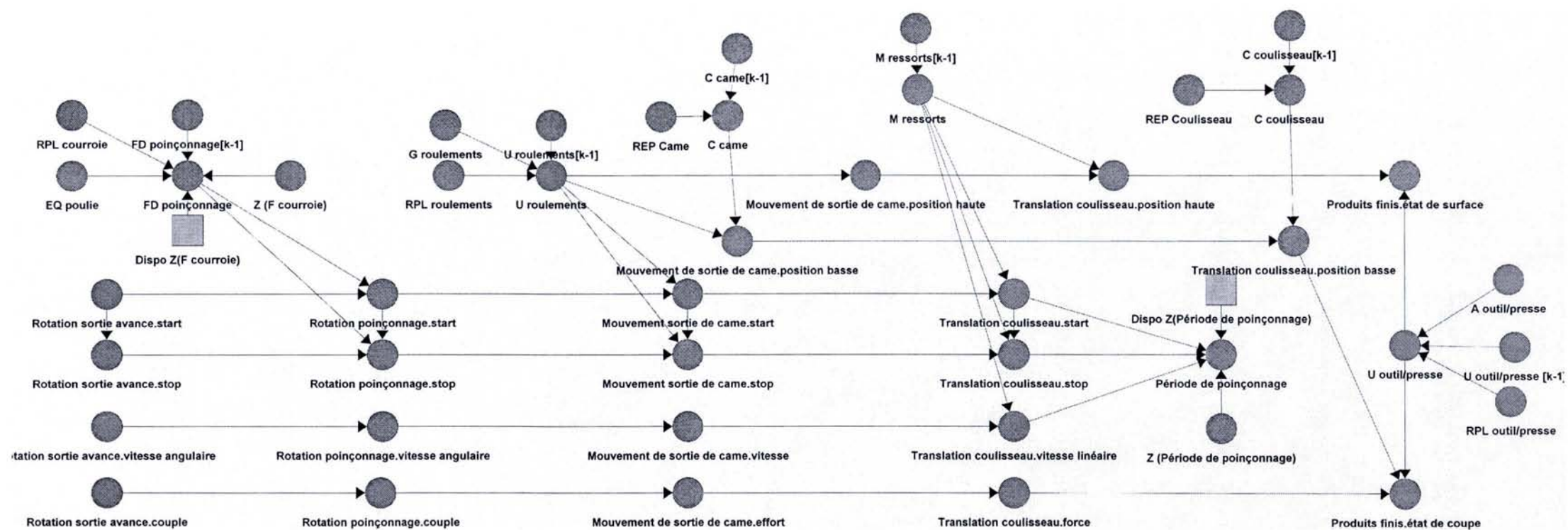


Figure 95 - Modèle de pronostic du processus "Poinçonner la bande"

6. Construction du modèle de pronostic

Le modèle de pronostic du processus *Poinçonner la bande* résulte de l'intégration des indicateurs et des interventions de maintenance du modèle événementiel (§IV.5) dans le modèle probabiliste élaboré au §IV.4 (Figure 95).

6.1. Intégration des indicateurs de dégradation

Indicateur de déviation d'un flux

L'intégration de l'indicateur de la période de poinçonnage se traduit par la création d'un couple de variables événementielles Z (*Période poinçonnage*), $Dispo\ Z$ (*Période poinçonnage*) qui met en adéquation l'état de la variable *Période poinçonnage* par rapport à son état observé (Figure 96) :

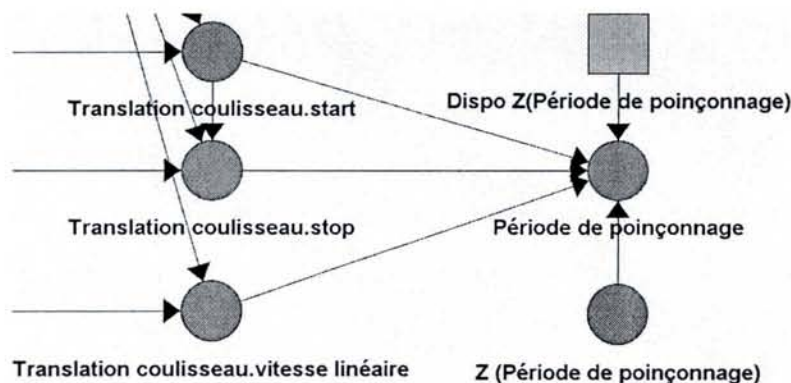


Figure 96 - Intégration du modèle événementiel de la dégradation (déviations de flux)

$Dispo\ Z$ (*Période poinçonnage*) est une variable booléenne d'espace d'états {Vrai, Faux} alors que les états de la variable Z (*Période poinçonnage*) sont basés sur les états de la variable $Z_{Période\ poinçonnage}$:

▪ Z (<i>Période poinçonnage</i>) = -2	⇔	$-2,5 < Période\ poinçonnage \leq -1,5$
▪ Z (<i>Période poinçonnage</i>) = -1	⇔	$-1,5 < Période\ poinçonnage \leq -0,5$
▪ Z (<i>Période poinçonnage</i>) = 0	⇔	$-0,5 < Période\ poinçonnage \leq 0,5$
▪ Z (<i>Période poinçonnage</i>) = 1	⇔	$0,5 < Période\ poinçonnage \leq 1,5$
▪ Z (<i>Période poinçonnage</i>) = 2	⇔	$1,5 < Période\ poinçonnage \leq 2,5$
▪ Z (<i>Période poinçonnage</i>) = PAS	⇔	$Période\ de\ poinçonnage > 2,5$

L'impact de l'observation de la période de poinçonnage sur l'état de l'attribut de flux *Période poinçonnage* est formalisé dans la TPC $\theta_{Période\ poinçonnage}$, par l'équation suivante :

▪ Période poinçonnage =
<i>Si</i> $Dispo\ Z$ (<i>Période poinçonnage</i>) = Vrai <i>Alors</i> Z (<i>Période poinçonnage</i>)

Indicateur de détérioration d'un composant

L'intégration de l'indicateur de la fatigue de la courroie se traduit par la création dans le RBD d'un couple de variables Z (F courroie) et $Dispo Z$ (F courroie) (Figure 97) qui met à jour l'état de la variable FD poinçonnage :

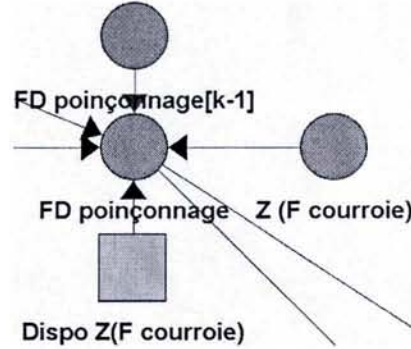


Figure 97 - Intégration du modèle événementiel de la dégradation (processus de détérioration)

Comme précédemment, les états de la variable Z (F courroie) sont basés sur les états de la variable $Z_{Fcourroie}$:

▪ Dispo Z (F courroie) = Faux	⇔	Etat de $Z_{Fcourroie}$ indéterminé
▪ Z (F courroie) = OK	⇔	Observation d'un bon état de fonctionnement de la courroie
▪ Z (F courroie) = Dégradé	⇔	Observation d'un allongement de la courroie
▪ Z (F courroie) = HS	⇔	Observation d'une courroie défailante

- L'impact de l'observation de l'état de la courroie sur le processus de détérioration FD poinçonnage est plus complexe à définir, car il n'existe pas de correspondance directe entre les états de l'indicateur $Z_{Fcourroie}$ et les états de la variable FD poinçonnage.

En effet, la connaissance de l'état de détérioration de la courroie ne permet pas de déterminer exactement l'état du $\{FD$ poinçonnage $\}$ puisque ce dernier dépend également de l'état du processus de désalignement des poulies.

La remise à jour de l'état de la variable FD poinçonnage est donc partielle. Elle est intégrée dans la TPC θ_{FD poinçonnage via l'équation déterministe FD poinçonnage = $f(Z_{Fcourroie})$:

▪ FD poinçonnage =
Si Dispo Z (F courroie) = Vrai,
Si Z (F courroie) = OK,
Si FD poinçonnage $[k-1] = (OK \wedge Allong.)$, alors FD poinçonnage $[k] = OK$,
Si FD poinçonnage $[k-1] = (D.léger \wedge Allong. \& D.léger.)$, alors FD poinçonnage $[k] = D.léger$,
Si FD poinçonnage $[k-1] = HS$ alors FD poinçonnage $[k] = HS$,
Si Z (F courroie) = Dégradation,
Si FD poinçonnage $[k-1] = (OK \wedge Allong.)$, alors FD poinçonnage $[k] = Allong$,
Si FD poinçonnage $[k-1] = (D.léger \wedge Allong. \& D.léger.)$,
alors FD poinçonnage $[k] = Allong. \& D.léger$,
Si FD poinçonnage $[k-1] = HS$ alors FD poinçonnage $[k] = HS$,
Si Z (F courroie) = HS, alors FD poinçonnage $[k] = HS$.

6.2. Intégration des interventions de maintenance

L'intégration des opérations de maintenance (Remplacement _{Courroie} et Réparation _{Poulie}) susceptibles d'être exécutées sur le *Système Courroie / Poulies poinçonnage* se traduit par la création des variables *RPL Courroie* et *EQ Poulie* (Figure 98) qui mettent à jour l'état de la variable *FD poinçonnage* lorsqu'une intervention de maintenance est réalisée.

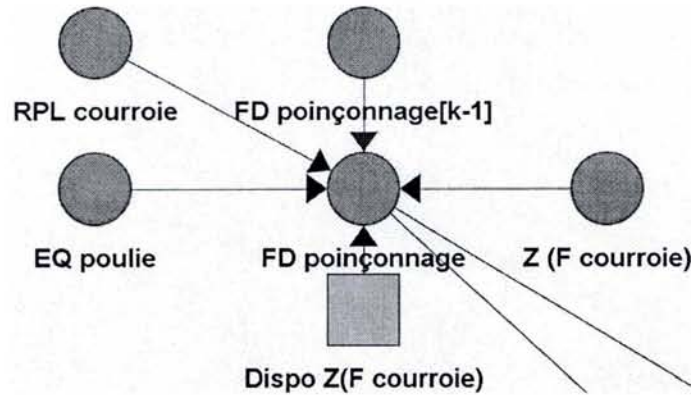


Figure 98 - Intégration du modèle événementiel de la maintenance

- Le remplacement de la courroie est considéré comme une opération de maintenance parfaite qui rétablit la courroie dans son état nominal après intervention. Son impact sur le processus de détérioration $\{FD_{\text{poinçonnage}}\}$ est formalisé dans la TPC $\theta_{FD_{\text{poinçonnage}}}$ par les probabilités conditionnelles suivantes :

- $p(FD_{\text{poinçonnage}}_{k+1}=OK / RPL_{\text{Courroie}}_k, FD_{\text{poinçonnage}}_k = OK \wedge Allong.) = 1$
- $p(FD_{\text{poinçonnage}}_{k+1}=D.léger / RPL_{\text{Courroie}}_k, FD_{\text{poinçonnage}}_k = D.léger \wedge Allong. \& D.léger) = 1$
- $p(FD_{\text{poinçonnage}}_{k+1}=OK / RPL_{\text{Courroie}}_k, FD_{\text{poinçonnage}}_k = HS) = 1^*$

- La réparation des poulies est considérée comme une opération de maintenance imparfaite qui a 80% de chance de rétablir les poulies dans l'état nominal et 20% de chance de laisser les poulies dans l'état de dégradation. Son impact sur le processus de détérioration $\{FD_{\text{poinçonnage}}\}$ est formalisé de la même manière que l'impact du remplacement de la courroie :

- $p(FD_{\text{poinçonnage}}_{k+1}=OK / EQ_{\text{Poulie}}_k, FD_{\text{poinçonnage}}_k = OK) = 1$
- $p(FD_{\text{poinçonnage}}_{k+1}=Allong. / EQ_{\text{Poulie}}_k, FD_{\text{poinçonnage}}_k = Allong.) = 1$
- $p(FD_{\text{poinçonnage}}_{k+1}=OK / EQ_{\text{Poulie}}_k, FD_{\text{poinçonnage}}_k = D.léger) = 0,8$
- $p(FD_{\text{poinçonnage}}_{k+1}=D.Léger / EQ_{\text{Poulie}}_k, FD_{\text{poinçonnage}}_k = D.léger) = 0,2$
- $p(FD_{\text{poinçonnage}}_{k+1}=Allong. / EQ_{\text{Poulie}}_k, FD_{\text{poinçonnage}}_k = Allong. \& D.léger) = 0,8$
- $p(FD_{\text{poinçonnage}}_{k+1}=Allong. \& D.léger / EQ_{\text{Poulie}}_k, FD_{\text{poinçonnage}}_k = Allong. \& D.léger) = 0,2$
- $p(FD_{\text{poinçonnage}}_{k+1}=OK / EQ_{\text{Poulie}}_k, FD_{\text{poinçonnage}}_k = HS) = 1^*$

* : en cas de défaillance, on suppose que le *Système Courroie / Poulies poinçonnage* est remis complètement à l'état neuf (OK).

7. Mise en œuvre du processus de pronostic du système de Déroulage / Pressage sur la plate-forme TELMA

Après avoir conçu le processus de pronostic du système de Déroulage / Pressage, nous allons maintenant l'implanter sur l'architecture de e-maintenance de la plate-forme TELMA.

7.1. Architecture opérationnelle du système intégré de maintenance prévisionnelle de TELMA

L'architecture opérationnelle du SIMP rassemble des outils logiciels, des bases de données, des réseaux de communication... qui supportent les modèles (ainsi que leurs mécanismes de mise à jour) développés dans la phase de construction (Figure 99).

L'architecture opérationnelle du SIMP de la plate-forme TELMA est en cours de développement.

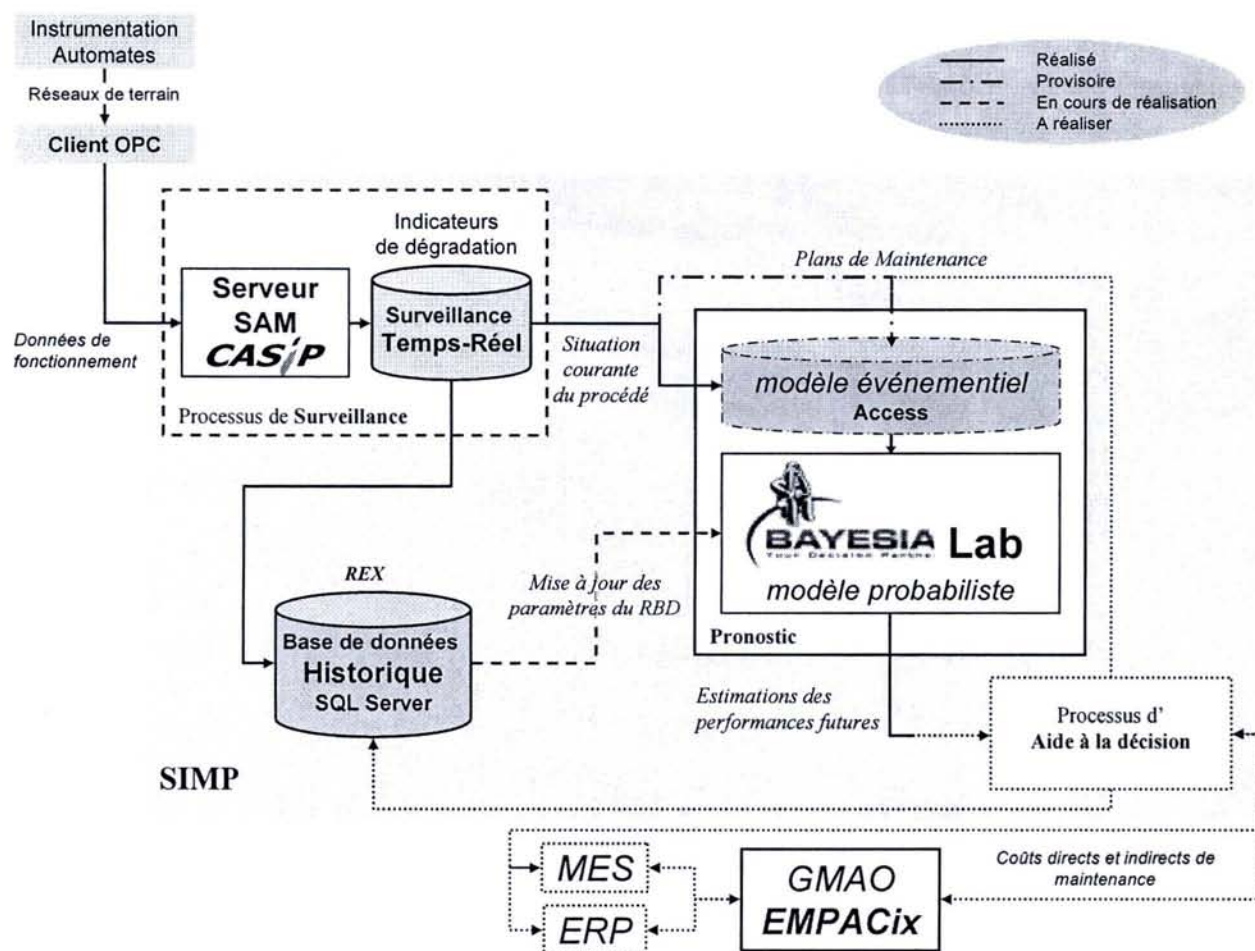


Figure 99 - Architecture opérationnelle du SIMP de la plate-forme TELMA

Ainsi, le processus d'aide à la décision n'est pas encore développé et la description des plans de maintenance est pour le moment réalisée manuellement au niveau du processus de surveillance, sous CASIP SAM. Cependant, cette situation n'empêche pas la mise en œuvre du processus de pronostic à condition de faire quelques adaptations nécessitées par l'absence du processus d'aide à la décision.

7.2. Implantation du processus de pronostic

Le processus de pronostic est supporté par une base de données ACCESS (pour la partie événementielle) et par le logiciel BAYESIA Lab (pour la partie probabiliste).

7.2.1. Implantation du modèle événementiel

7.2.1.1. Définition des variables

La base de données ACCESS "Modèle événementiel" est composée de deux tables, contenant respectivement les indicateurs de dégradation et les interventions de maintenance envisageables sur le système de Déroulage / Pressage (Figure 100).

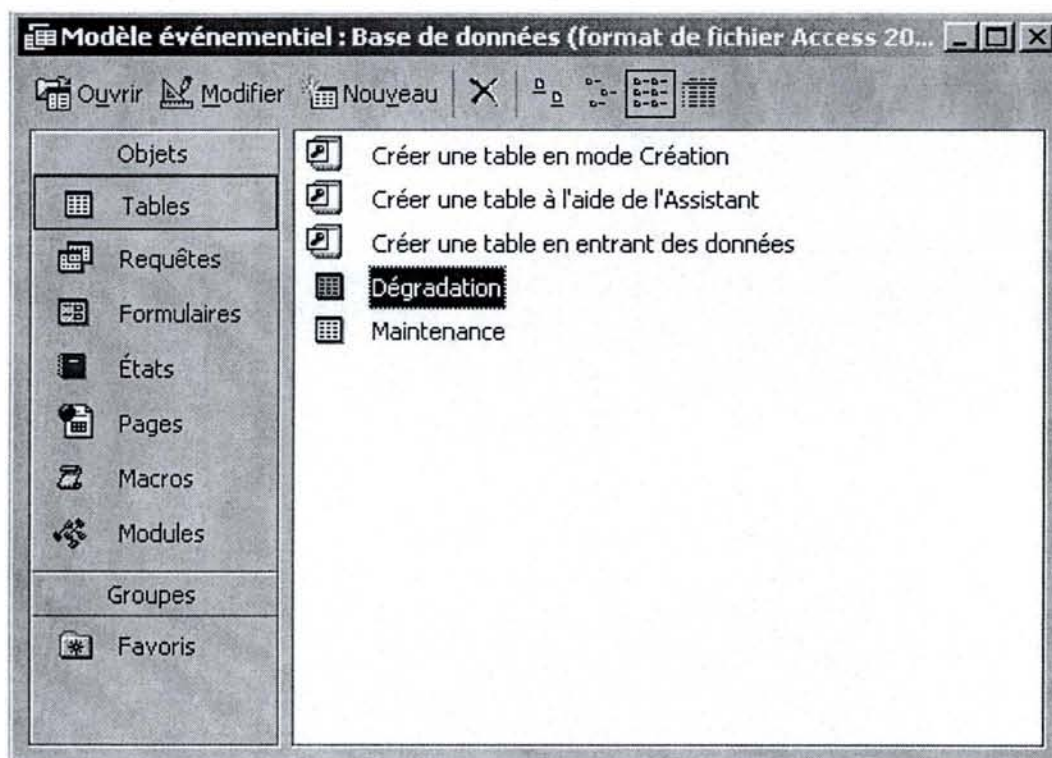


Figure 100 - Base de données ACCESS support du modèle événementiel

La table "Dégradation" contient cinq champs (Figure 101) : la description de l'indicateur, le nom de la variable du RBD associée, la disponibilité actuelle de l'indicateur, l'état courant (utilisé seulement pour les indicateurs d'états de processus de détérioration), la valeur courante (utilisée uniquement pour les observations des attributs de flux).

Dégradation				
Indicateur de dégradation	Nom de la variable du RBD	Disponibilité	Etat courant	Valeur courante
Période poinçonnage	Z (Période de poinçonnage)	Oui	-	25
Fatigue de la courroie	Z (F courroie)	Oui	OK	-

Figure 101 - Extrait de la table "Dégradation" qui concerne le processus *Poinçonner la bande*

La table "Maintenance" contient quant à elle huit champs (Figure 102) : la description de l'intervention, le nom de la variable du RBD associée, la réalisation (éventuelle), la nature (périodique ou non), la périodicité (uniquement pour les interventions périodiques), la date des trois premières interventions prévues (pour les interventions apériodiques).

Maintenance							
Intervention de maintenance	Nom de la variable du RBD	Réalisation	Périodique	Périodicité	Date 1	Date 2	Date 3
Remplacement de la courroie	RPL courroie	Non	Non	0	0	0	0
Graissage des roulements	G roulements	Oui	Oui	100	0	0	0
Remplacement des roulements	RPL roulements	Non	Non	0	0	0	0
Equilibrage des poulies	EQ poulies	Non	Non	0	0	0	0
Remplacements des ressorts	RPL ressorts	Non	Non	0	0	0	0
Réparation système arbre à came	REP came	Non	Non	0	0	0	0
Réparation coulisseau	REP coulisseau	Non	Non	0	0	0	0
Affûtage de l'outil de coupe	A outil/presse	Non	Non	0	0	0	0
Remplacement de l'outil de coupe	RPL outil/presse	Non	Non	0	0	0	0

Figure 102 - Extrait de la table "Maintenance" qui concerne le processus *Poinçonner la bande*

7.2.1.2. Mise à jour du modèle événementiel

Le modèle événementiel est mis à jour à chaque demande de pronostic formulée par le processus d'aide à la décision. Cette opération est actuellement réalisée manuellement grâce à la variable MAJ_model_evenementiel intégrée dans l'outil CASIP SAM.

Lorsque cette variable passe de l'état 0 à l'état 1, les tables "Dégradation" et "Maintenance" de la base de données ACCESS sont mises à jour en fonction des valeurs courantes des indicateurs de dégradation élaborées par le processus de surveillance et des interventions de maintenance programmées manuellement¹⁰³.

Cette opération est réalisée par CASIP SAM, qui met à jour la base de données ACCESS suivant des requêtes spécifiques à chaque indicateur et à chaque intervention de maintenance.

¹⁰³Solution provisoire en attendant la conception et la mise en œuvre du processus d'aide à la décision.

La Figure 103 illustre, par exemple, la mise à jour de la période de poinçonnage dans le modèle événementiel, à partir de l'état courant de l'indicateur de dégradation Zperiode_poinçonnage.

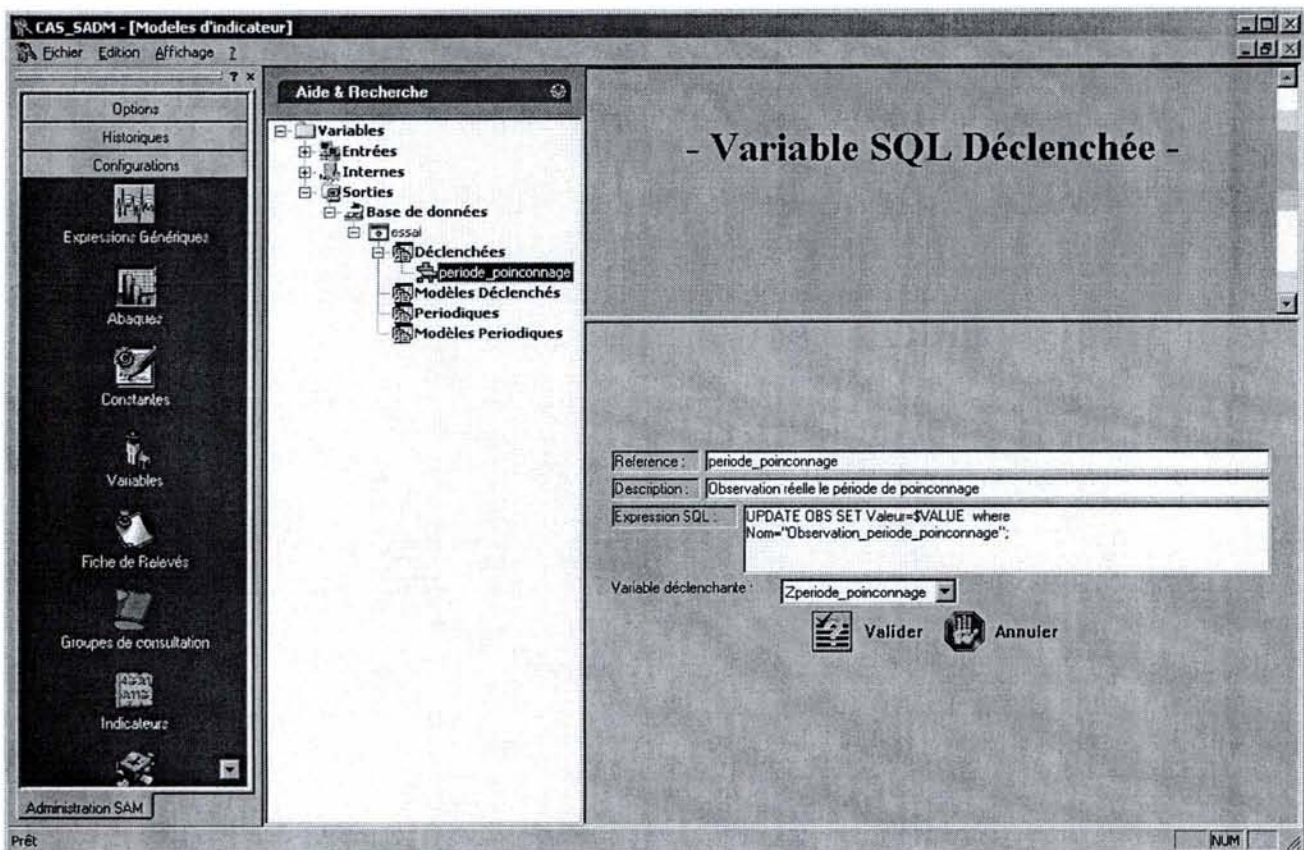


Figure 103 - Mise à jour de la valeur courante de la période de poinçonnage

7.2.2. Implantation du modèle probabiliste

L'outil BAYESIA Lab, support du modèle probabiliste, réalise la simulation attendue par le processus de pronostic sur la période de temps demandée, à partir d'un algorithme d'inférence itérative adapté à la représentation compacte des RBD (§III.8).

7.2.2.1. Intégration de l'état du modèle événementiel

L'état du modèle événementiel est intégré au RBD par l'intermédiaire d'un fichier d'observations (fichier texte) généré par la base de données "Modèle événementiel". Chaque ligne du fichier représente l'état à un instant donné des variables du RBD représentant les indicateurs et les interventions de maintenance.

Ce fichier texte est associé au modèle de pronostic sous BAYESIA Lab par l'intermédiaire d'une barre d'outils spécifique (Figure 104).

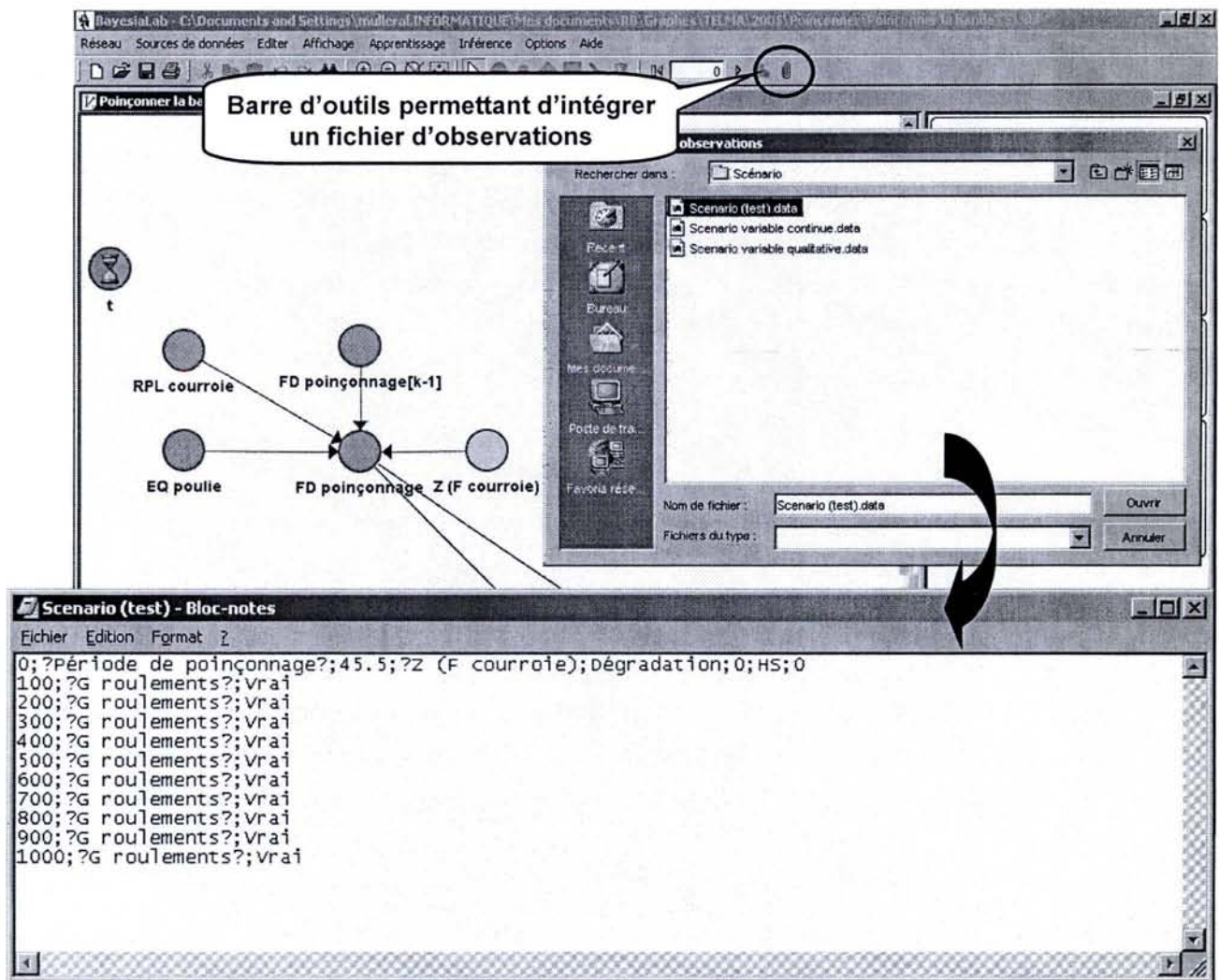


Figure 104 - Fichier d'observations associé à l'état du modèle événementiel

7.2.2.2. Simulation

La simulation réalisée par BAYESIA Lab actualise à chaque instant k et sur la période demandée $[0; T]$, les distributions de probabilités des variables du modèle de pronostic grâce au mécanisme d'inférence temporelle décrit au §III.5.1. Le logiciel permet de réaliser la simulation pas à pas ou alors sur une période de temps T à définir.

Lorsque la simulation est terminée, il est possible de consulter l'état des différentes variables du RBD à l'instant final $k = T$, et d'exporter un fichier de données contenant l'évolution sur la période $[0; T]$ de variables sélectionnées au préalable.

7.3. Réalisation du pronostic

Supposons que nous souhaitons réaliser le pronostic du processus "Poinçonner la bande" à l'instant $k = 1000$. En accord avec les objectifs fixés au §III.3.1, la mission du processus de pronostic est de déterminer à cet instant :

- l'état de détérioration des composants du système de poinçonnage,

- l'état des flux consommés et produits par le système de poinçonnage, à partir desquels sont déterminés les critères de performances du processus (*Période de poinçonnage*, *Produits finis.état de coupe* et *Produits finis.état de surface*).

La procédure de réalisation du pronostic débute par la mise à jour du modèle événementiel, déclenchée grâce au changement d'état de la variable MAJ_model_evenementiel. L'exportation de l'état du modèle événementiel sous un fichier texte puis son intégration sous BAYESIA Lab permet alors d'initialiser l'état du modèle de pronostic (Figure 105). Dans cet exemple, le fichier d'observations¹⁰⁴ contient les informations suivantes :

- État courant du système ($k=0$) issu des indicateurs de dégradation
 - $Z(\text{Période poinçonnage})_0 = 45,5$
 - $p(\text{F courroie} = \text{Dégradation})_0 = p(\text{F courroie} = \text{HS})_0 = 0$
- Plan de maintenance sur la période [$k=0$; $k=1000$]
 - Graissage périodique des roulements toutes les 100 unités de temps
 - $G \text{ roulements}_{100} = G \text{ roulements}_{200} = \dots = G \text{ roulements}_{1000} = \text{Vrai}$

Ensuite, la simulation est lancée sur la période demandée (1000 unités de temps). Sa durée est inférieure à 3 minutes 30 secondes. Lorsqu'elle est terminée, on obtient les états de l'ensemble des variables du RBD à $k = 1000$, exprimés sous forme de distributions de probabilités (Figure 106).

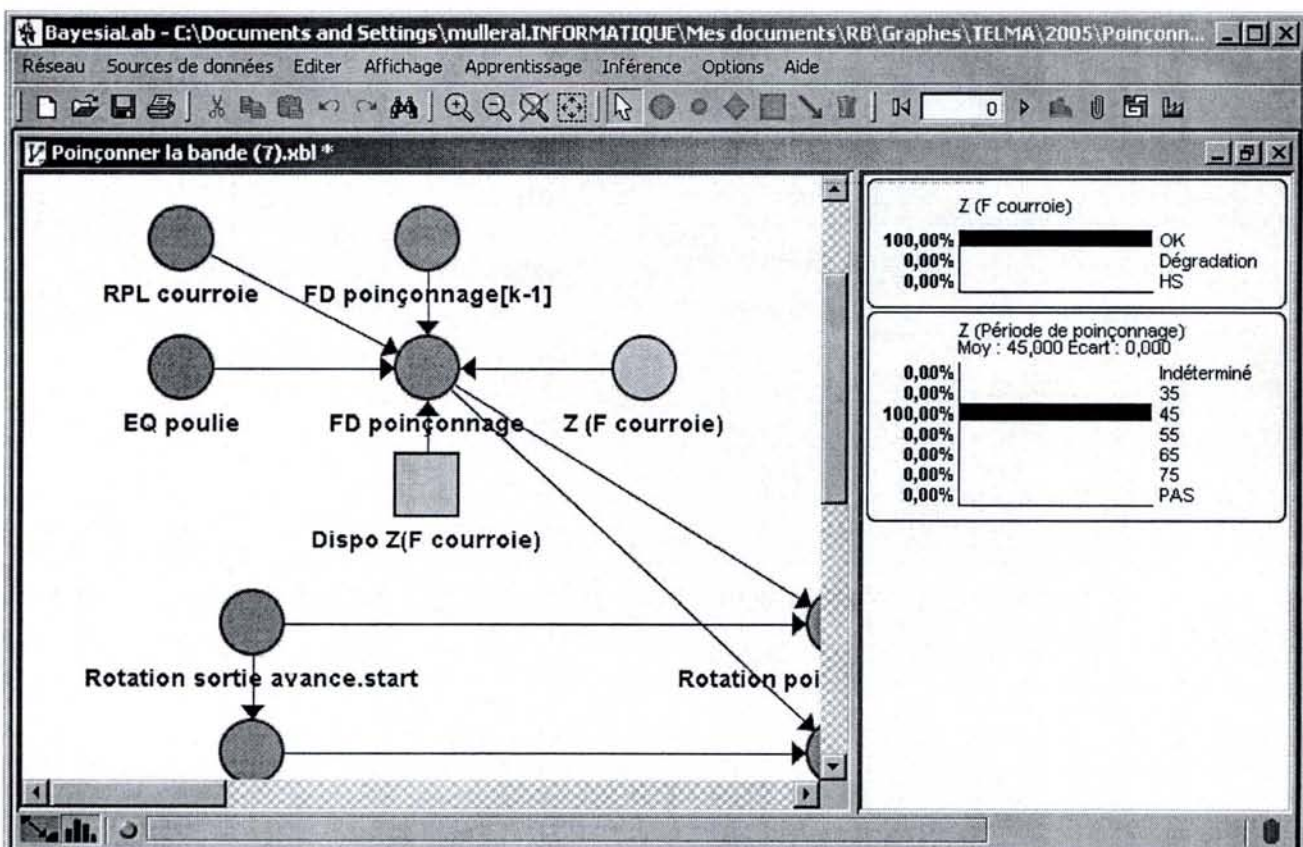


Figure 105 - Initialisation du modèle de pronostic

¹⁰⁴ Sous forme d'un fichier texte où chaque ligne correspond à la spécification d'une évidence à un instant précis.

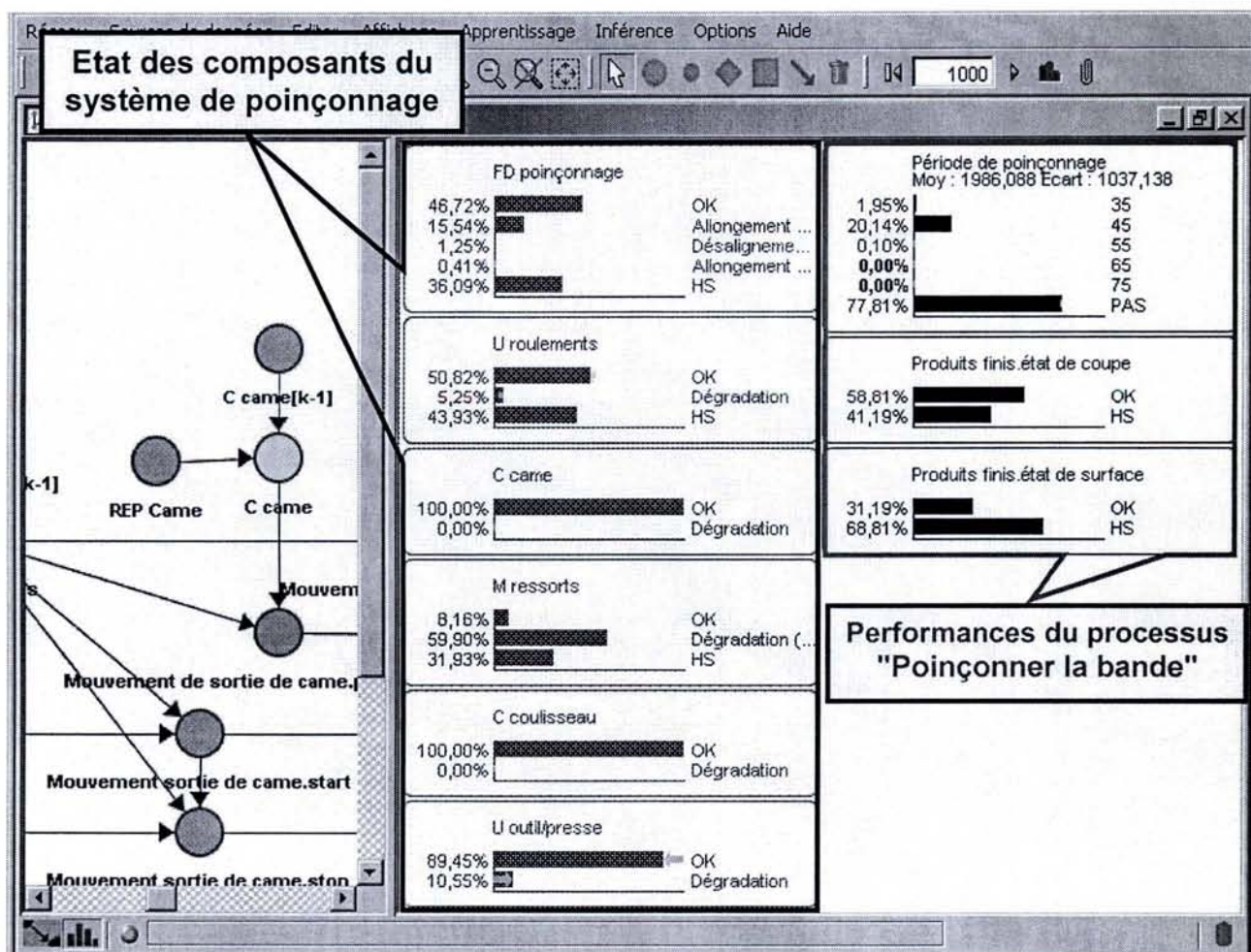


Figure 106 - Pronostic du système de poinçonnage à $k = 1000$

D'après les estimations obtenues, il y a près de 78% de chance que le processus de poinçonnage ne soit pas capable de réaliser sa mission dans 1000 unités de temps. Les attributs "état de surface" et "état de coupe" du flux *Produits finis* subissent dans le même temps une dégradation importante, avec respectivement 69 et 41 % de chance d'être dans l'état défaillant "HS" à $k = 1000$.

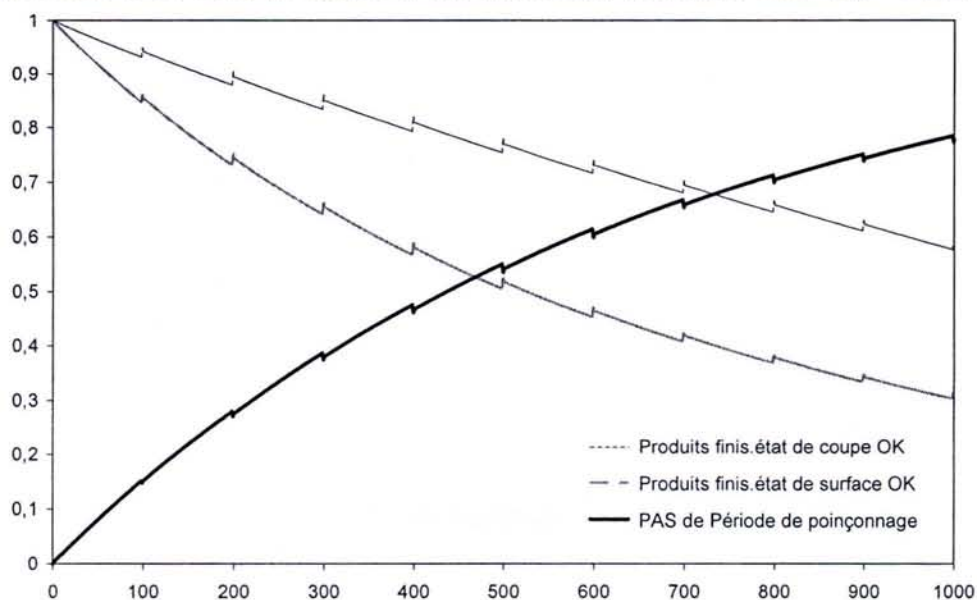


Figure 107 - Évolution des performances du système de poinçonnage sur la période [0 ; 1000]

La courbe d'évolution de ces trois critères de performances sur la période $[0 ; 1000]$ (Figure 107) met en évidence l'importance de la dégradation ainsi que l'impact du graissage des roulements effectué toutes les 100 unités de temps.

Au vu des résultats obtenus, on s'aperçoit que la dégradation des performances du processus *Poinçonner la bande* est causée principalement par la détérioration des roulements du *système arbre à came* et des ressorts du *système coulisseau + ressort poinçonnage*.

En injectant des évidences au modèle de pronostic à $k = 1000$, on peut déterminer l'impact du remplacement de ces deux composants sur la performance du processus (Figure 108).

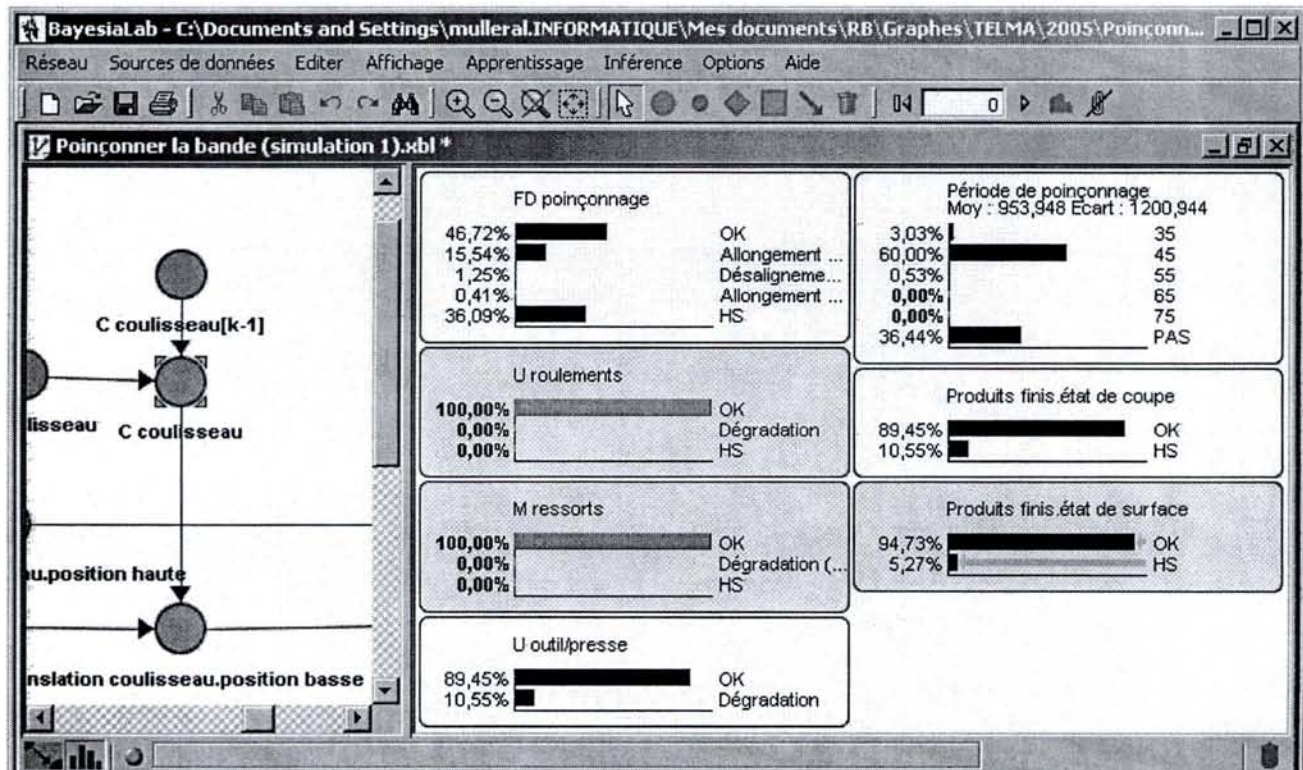


Figure 108 - Pronostic du processus *Poinçonner la bande* à $k = 1000$ avec remplacement de composants

7.4. Mise à jour et validation des paramètres du modèle de pronostic

Avant d'utiliser le processus de pronostic en phase d'exploitation, il est indispensable de valider le comportement du modèle de pronostic par rapport au comportement réel du procédé physique. Cette étape nécessite à la fois la validation de la structure du RBD et la mise à jour de ses paramètres.

Il s'agit de valider, d'une part, les paramètres des processus stochastiques de détérioration des composants du système de Déroulage / Pressage et, d'autre part, les TPC des attributs de flux intégrant la formalisation quantitative des relations causales de type *Détérioration d'un composant* $\Rightarrow$ *Déviaton d'un attribut de flux*. Ce deuxième point soulève notamment le problème de la discrétisation des variables continues (représentant les attributs de flux) qui engendre une incertitude sur la connaissance de la valeur de la variable concernée, proportionnelle à son pas de

discrétisation. Pour garantir la cohérence du modèle de pronostic par rapport au processus de surveillance, cette incertitude doit être inférieure ou égale à l'incertitude associée aux indicateurs de dégradation.

Afin de réaliser cette phase de validation, nous constituons à l'heure actuelle une base de données de retour d'expérience (REX) liée au fonctionnement du système de Déroulage / Pressage à partir de l'historisation des variables du processus de surveillance.

Cette base de données sera utilisée pour mettre à jour les paramètres (voire la structure) du modèle de pronostic. Différents algorithmes d'apprentissage allant du simple apprentissage paramétrique (parcours de l'ensemble des cas décrits par la base et mise en accord des différentes tables de probabilités avec les fréquences rencontrées) aux types d'apprentissage structurel¹⁰⁵ peuvent être mis en œuvre.

Par ailleurs, la plate-forme TELMA intègre progressivement un système de génération aléatoire de dégradations et de défaillances qui a pour objectif de simuler l'occurrence de certains modes de fonctionnement dégradés ou défaillants du système de Déroulage / Pressage. L'utilisation de ce système facilite à l'heure actuelle la définition des TPC des attributs de flux (détermination de l'impact des dégradations/défaillances sur les performances du procédé).

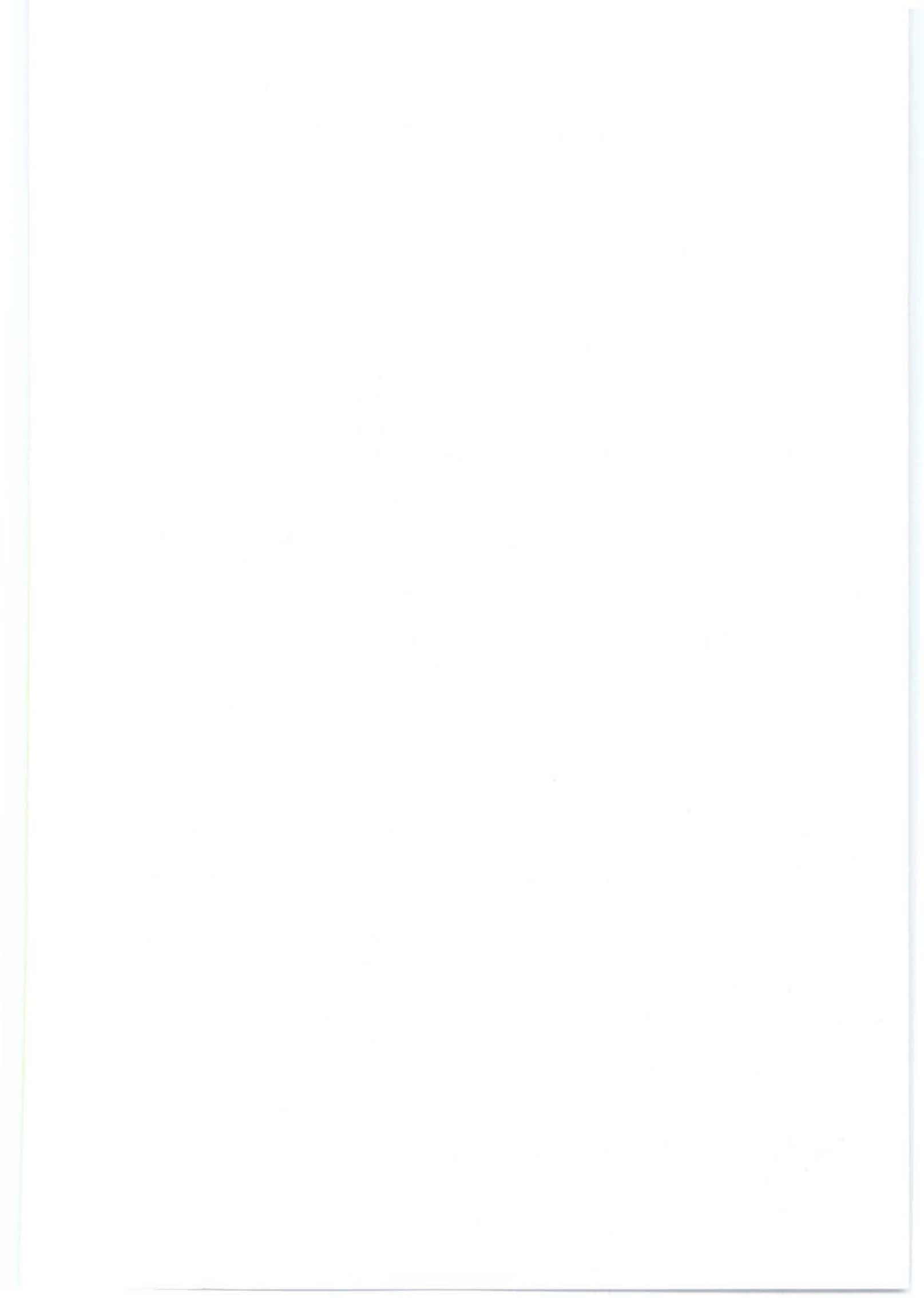
8. Conclusion

La mise en œuvre du processus de pronostic sur le système Déroulage / Pressage de la plate-forme TELMA a permis de montrer la faisabilité de la méthodologie proposée. Toutefois, elle met aussi en avant le fait que la construction du modèle de pronostic requiert une quantité importante d'informations relatives au (dys)fonctionnement de la plate-forme. De plus, la qualité du modèle de pronostic dépend bien évidemment de la qualité de ces informations.

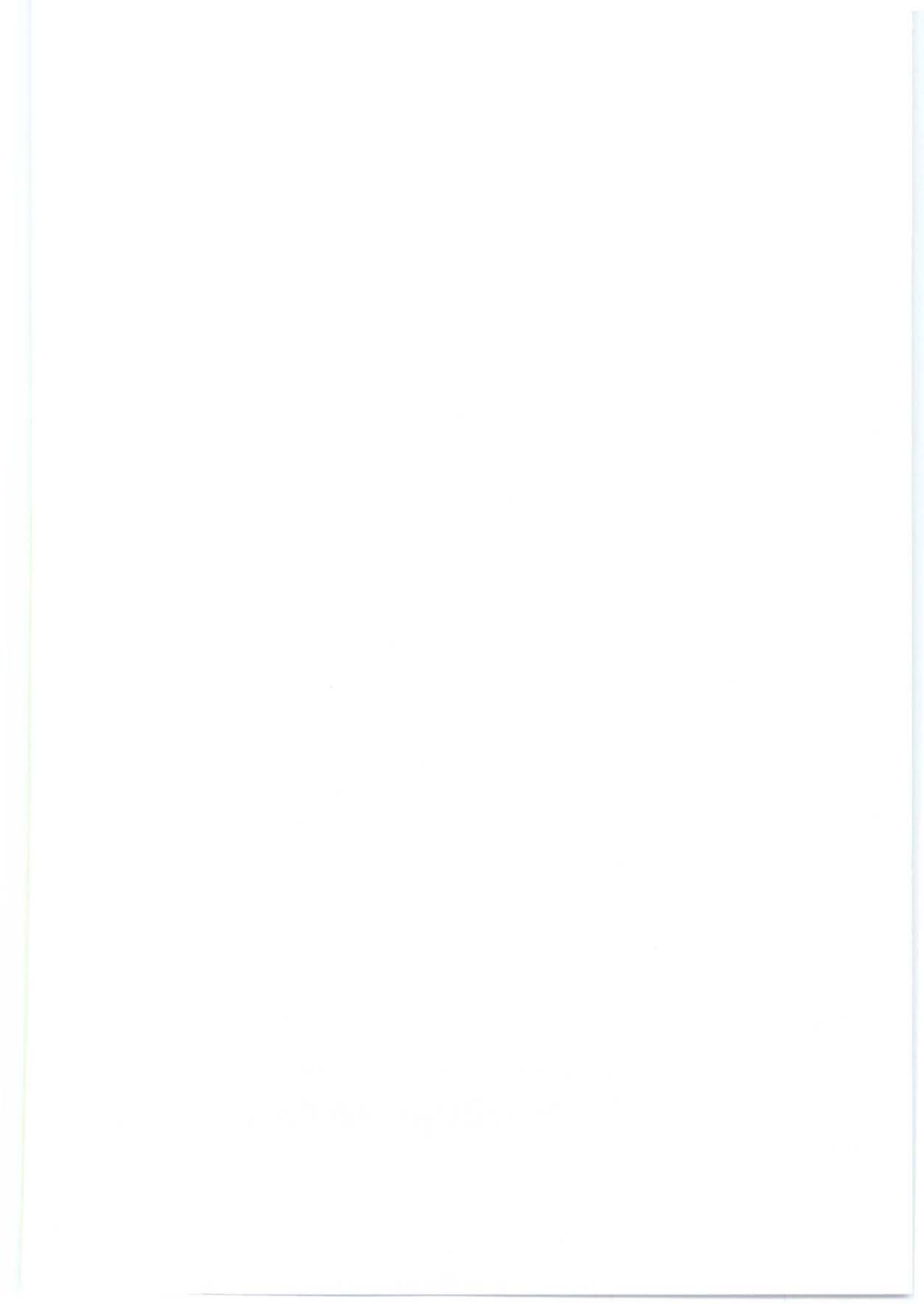
Aujourd'hui, pour obtenir une quantification de la valeur ajoutée du processus de pronostic, il est indispensable d'attendre :

- qu'une base de données significative de REX soit constituée sur la plate-forme TELMA afin d'affiner la structure et les paramètres du modèle de pronostic,
- que les processus de surveillance et d'aide à la décision soient implantés sur la plate-forme afin de mettre en place la stratégie de maintenance prévisionnelle sur le système de Déroulage / Pressage et d'en évaluer l'efficacité par rapport à la stratégie actuelle de maintenance.

¹⁰⁵ Algorithmes d'apprentissage non supervisé basés par exemple sur les méthodes Taboo, Taboo order, Expectation-Maximisation [Bendou *et al.*, 2003], [Jouffe, 2002].



Conclusion générale



Conclusion et Perspectives

Contribution scientifique

Nous montrons dans cette thèse l'intérêt de mettre en place un système intégré de maintenance prévisionnelle dans le cadre du maintien en conditions opérationnelles du système de production et nous proposons en ce sens une méthodologie de formalisation de son processus clé : le pronostic.

En effet, avec l'émergence du développement durable, le défi actuel des industriels consiste à trouver le meilleur compromis entre les différents enjeux économiques, sociaux et environnementaux auxquels l'entreprise doit répondre. Ce défi se décline concrètement au niveau du système d'exécution de la production par le concept de maintien en conditions opérationnelles devant garantir, tout au long de la phase d'exploitation, la finalité attendue du système par une maîtrise holistique de ses performances. Cette volonté remet en cause le mode de fonctionnement classique du processus pivot de maintenance en lui imposant la nécessité de devenir plus coopératif avec le reste de l'entreprise et plus proactif au niveau de sa gestion des interventions. Une des solutions permettant de combiner ces deux aspects consiste alors à développer un système intégré de maintenance prévisionnelle.

Facilité à l'heure actuelle par l'explosion conjuguée des technologies de l'information et de la communication et des technologies de maintenance prévisionnelle, la mise en œuvre d'un système intégré de maintenance prévisionnelle requiert cependant la formalisation de ses processus fondamentaux et leur intégration dans un système cohérent, lui-même intégré dans le système d'information de l'entreprise.

Nos travaux sur la formalisation du processus de pronostic, considéré depuis toujours comme le talon d'Achille de la maintenance prévisionnelle, sont justifiés par le manque de réponses concrètes apportées par la communauté scientifique sur le développement d'un processus de pronostic applicable (et efficace) aussi bien au niveau d'un composant critique qu'au niveau d'un procédé industriel complexe. Pour arriver à cette conclusion, nous avons étudié et comparé les trois principales classes d'approches de pronostic proposées par la communauté scientifique : Pronostic basé sur un modèle physique, Pronostic guidé par les données et Pronostic basé sur l'expérience. Nous avons ainsi constaté qu'aucune approche ne répondait globalement aux caractéristiques de complexité et de dynamique des systèmes de production actuels pour différentes raisons : approche réduite à un niveau "composant élémentaire", décalage entre la complexité du modèle proposé et le système réel, absence de feed-back entre l'évolution du système réel et celle de son modèle.

Afin de profiter simultanément des avantages et d'éliminer (en partie) les inconvénients des approches prises séparément, nous avons alors proposé une méthodologie de modélisation du processus (intégré) de pronostic qui s'appuie sur un couplage d'approches probabiliste et événementielle. L'intérêt de ce couplage est simple : bénéficier conjointement des apports de la connaissance probabiliste du comportement du système et de la dimension temps réel du côté événementiel de manière à limiter les risques de dérive de la modélisation par rapport à la réalité.

La méthodologie proposée repose sur quatre étapes :

- Formalisation des connaissances nécessaires à la construction du modèle probabiliste (étape concrétisée par un modèle du fonctionnement et un modèle dynamique).
- Élaboration du modèle probabiliste (comportemental) par couplage des deux modèles précédents (utilisation de mécanismes génériques de construction).
- Construction du modèle événementiel à partir de connaissances issues des processus de surveillance et d'aide à la décision du SIMP.
- Construction du modèle de pronostic par couplage des modèles probabiliste et événementiel.

La méthodologie est construite sur le respect de concepts, de méthodes, de modèles dont la pertinence et l'efficacité ont été reconnues par la communauté scientifique et industrielle. Elle définit des règles de construction génériques du modèle comportemental qui apportent une première garantie (nécessaire mais pas suffisante) de la validité de l'approche proposée.

C'est pourquoi nous avons ensuite mis en œuvre le processus de pronostic sur le système complexe de Déroulage / Pressage de la plate-forme TELMA, ce qui nous a permis de démontrer la faisabilité de la méthodologie proposée aussi bien d'un point de vue "construction du modèle comportemental", que d'un point de vue "intégration du processus de pronostic dans une architecture de e-maintenance".

Durant la phase de construction du modèle de pronostic, nous avons constaté que la mise en œuvre de la méthodologie sur un système complexe nécessitait un degré de connaissance très élevé du fonctionnement et surtout du dysfonctionnement du procédé et des moyens de production. La phase de formalisation des connaissances fait appel à un certain nombre d'experts dont la compétence joue un rôle crucial dans la qualité finale du modèle élaboré.

Cependant, l'acquisition de données de fonctionnement via l'historisation du modèle événementiel doit permettre d'ajuster le modèle de pronostic par rapport à l'évolution du système réel et de corriger *a posteriori* les erreurs ou les approximations commises dans la phase initiale de construction.

Perspectives liées à ces travaux

Les perspectives liées à ces travaux à court/moyen terme concernent l'extension et la finalisation de la phase de validation de la méthodologie proposée. Ensuite, à plus long terme, plusieurs axes de recherche complétant les propositions déjà établies ou levant certaines hypothèses de modélisation sont envisageables.

Ainsi à court terme, afin d'évaluer la valeur ajoutée du processus de pronostic et du système intégré de maintenance prévisionnelle sur le processus de MCO et sur la performance globale de la plate-forme TELMA, il est indispensable :

- de constituer une base de données de retour d'expérience significative permettant de valider la structure et les paramètres du modèle de pronostic,
- de réaliser une étude de sensibilité du pronostic à partir d'une analyse des effets de l'incertitude sur les paramètres du modèle RBD,

- de développer les processus de surveillance et d'aide à la décision afin de mettre en œuvre la stratégie de maintenance prévisionnelle sur le système de Déroulage / Pressage et de comparer son efficacité vis-à-vis de la stratégie actuelle de maintenance,
- de porter la méthodologie sur un cas industriel réel, par exemple dans le cadre du projet européen DYNAMITE¹⁰⁶ ou de la collaboration actuelle du GT MACOD avec la DCN¹⁰⁷.

Par ailleurs, il est envisageable de développer un outil support de la méthodologie, permettant d'automatiser la démarche, tout en rendant transparent aux yeux de l'utilisateur l'ensemble des concepts, méthodes, modèles intégrés dans la méthodologie.

A moyen terme, d'un point de vue perspectives de recherche, la première perspective consisterait à accroître le degré d'assistance du concepteur lors de la définition des attributs de flux (et plus spécifiquement la définition des attributs temporels) et lors de la sélection des modes de dégradation critiques réalisées lors de l'étude dysfonctionnelle du système de production.

- Dans le premier cas, nous pourrions envisager de définir les attributs de flux dès l'approche processus en intégrant des spécifications complémentaires à la procédure de décomposition du système. Une seconde solution consisterait à adapter les analyses AMDEC et HAZOP pour la prise en compte de propriétés temporelles et de dépendances des modes de dégradations et des déviations de flux [Bell *et al.*, 2004].
- Dans le second cas, il s'agirait de mettre en place une procédure d'évaluation de la criticité des modes de dégradation basée par exemple, sur l'utilisation de la logique floue [Pillay *et al.*, 2003].

La deuxième perspective concerne la prise en compte de l'influence de conditions opérationnelles ou environnementales variables sur les processus de détérioration qui n'est pas intégrée dans le modèle de pronostic actuel. La proposition de [Weber *et al.*, 2004] qui consiste à intégrer des variables exogènes dont le changement d'état engendre la modification des paramètres d'évolution des processus de détérioration, semble intéressante à suivre.

De plus, l'approche événementielle se limite à l'heure actuelle à une synchronisation de l'état du modèle probabiliste par rapport à la situation courante du procédé physique. Le renforcement de son rôle dans la réalisation du pronostic constitue une perspective de travail prometteuse.

Par exemple, l'extrapolation de l'état des indicateurs de dégradation par analyse de tendance (à l'aide de différents outils mathématiques tels que les méthodes de régression linéaire, les modèles de type ARMA ou les réseaux de neurones §II.3.2.2) permettrait de réaliser un pronostic combinant les résultats obtenus par analyse de tendance et par le modèle probabiliste actuel.

¹⁰⁶ Projet européen sur la prise de décision dynamique en maintenance IP DYNAMITE (FP6-IST-NMP-2-017498) dont le démarrage aura lieu en septembre 2005 avec la participation active du CRAN.

¹⁰⁷ Collaboration dont l'objectif est de montrer l'apport de stratégies conditionnelles et proactives comparées aux stratégies correctives et préventives mises en œuvre actuellement par la DCN (Direction de la Construction Navale) et ensuite de proposer des solutions facilitant le déploiement de ces stratégies sur ses bâtiments.

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique
54600 VILLERS-LES-NANCY

Bibliographie

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique
54600 VILLERS-LES-NANCY

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique
54600 VILLERS-LES-NANCY

Bibliographie

- Adjallah, K. (2004). *Proceedings of the International conference on Intelligent Maintenance systems (IMS'2004)*. CD-ROM, Arles, France.
- AFNOR (1984). *Norme NF E29-312 Robinetterie industrielle - Coefficients de débit et de perte massive d'énergie mécanique des appareils de robinetterie*. AFNOR, Paris.
- AFNOR (1986). *Norme X60-510 Techniques d'analyse de la fiabilité des systèmes - Procédures d'analyse des modes de défaillance et de leurs effets (AMDE)*. AFNOR, Paris.
- AFNOR (2001). *Norme X60-319 / NF EN 13306 : Terminologie de la maintenance*. AFNOR, Paris.
- AFNOR (2002). *Norme FD X60-000 : Maintenance industrielle - Fonction maintenance*. AFNOR, Paris.
- Al-Najjar, B. and I. Alsayouf (2003). Selecting the most efficient maintenance approach using fuzzy multiple criteria decision making. *Int. Journal of Production Economics*, **84**, pp. 85-100.
- Almeida, C. and K. Kanoun (1997). *Méthode des états fictifs dans les modèles de sûreté de fonctionnement*. Rapport LAAS N°97548.
- Andrews, J. D. and L. M. Bartlett (2005). A branching search approach to safety system design optimisation. *Reliability Engineering and System Safety*, **87**(1), pp. 23-30.
- Azam, M., F. Tu and K. R. Pattipati (2002). Condition Based Predictive Maintenance of Industrial Power Systems. In: *SPIE conference on Fault Diagnosis, Prognosis and System Health Management*, Orlando.
- Bangemann, T., D. Reboul, J. Scymanski, J-P. Thomesse and N. Zerhouni (2004). PROTEUS - An Integration Platform for Distributed Maintenance Systems. In: *International Conference on Intelligent Maintenance Systems (IMS'2004)*, Arles, France.
- Barata, J., C. Guedes Soares, M. Marseguerra and E. Zio (2002). Simulation modelling of repairable multi-component deteriorating systems for 'on condition' maintenance optimisation. *Reliability Engineering and System Safety*, **76**(3), pp. 255-264.
- Barlow, R.E. and L. C. Hunter (1960). Optimum Preventive Maintenance Policies. *Operations Research*, **8**, pp. 90-100.
- Barlow, R.E. and F. Proschan (1965). *Mathematical Theory of Reliability*. John Wiley, New York.
- Barros, A., C. Bérenguer and A. Grall (2004). On the hazard rate process for imperfectly monitored multi-unit systems. *Reliability Engineering and System Safety*, In Press, Available online 29 December 2004.
- Bell, J. and N. Snooke (2004). Describing System Functions that Depend on Intermittent and Sequential Behavior. In: *18th International Workshop on Qualitative Reasoning*, Northwestern University, Evanston, USA.
- Bengtsson, M. (2004). Condition Based Maintenance System Technology - Where is Development Heading ? In: *Proceedings of the 17th European Maintenance Congress Euromaintenance 2004*, Barcelona, Spain.
- Bendou, M. and P. Munteanu (2003). Learning Bayesian Networks from Noisy Data. In: *5th International Conference On Enterprise Information Systems (ICEIS)*, Angers, France.

- Bennett, B. H. and G. D. Hadden (1999). Condition-Based Maintenance: Algorithms and Applications for Embedded High Performance Computing. In: *4th International Workshop on Embedded HPC Systems and Applications (EHPC'99)*, San Juan, Puerto Rico.
- Béranger, C., C. Chu and A. Grall (1997). Inspection and Maintenance Planning: An Application of Semi-Markov Decision Processes. *Journal of Intelligent Manufacturing*, **8**(5), pp. 467-476.
- Bevilacqua, M. and M. Braglia (2000). The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering and System Safety*, **70**(1), pp. 71-83.
- Billington, R. and R. N. Allan (1983). *Reliability evaluation of engineering systems: concept and technics*. Plenum Press, New York, USA.
- Blaise, J.-C. (2000). *Apport d'une modélisation de l'information normative à l'intégration des règles de sécurité des machines en conception*. Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I.
- Bloch-Mercier, S. (2000). *Modèles et optimisation de politiques de maintenance de systèmes*. Doctorat de l'Université de Marne la Vallée.
- Bobbio, A., E. Ciancamerla, G. Franceschinis, R. Gaeta, M. Minichino and L. Portinale (2002). Methods of increasing modelling power for safety analysis applied to a turbine digital control system. In: *21st Int. Conference on Computer Safety, Reliability and Security*, Springer Verlag, vol. LNCS-2434, pp. 212-223.
- Bobbio, A., A. Horváth, M. Scarpa and M. Telek (2003). Acyclic discrete phase type distributions: properties and a parameter estimation algorithm. *Performance Evaluation*, **54**(1), pp. 1-32.
- Borgonovo, E., M. Marseguerra and E. Zio (2000). A Monte Carlo methodological approach to plant availability modeling with maintenance, aging and obsolescence. *Reliability Engineering and System Safety*, **67**(1), pp. 61-73.
- Bouissou, M. and T. Nguyen (2002). Decision making based on expert assessments: Use of Belief Networks to take into account uncertainty, bias, and weak signals. In: *13th European Safety and Reliability International Conference, ESREL- $\lambda\mu$ 2002*, Lyon, France.
- Bouissou, M. and J.L. Bon (2003). A new formalism that combines advantages of fault-trees and Markov models: Boolean logic driven Markov processes. *Reliability Engineering and System Safety*, **82**(2), pp. 149-163.
- Boyer, X. and D. Koller (1998). Tractable for Complex Stochastic Processes. In: *14th Annual Conference on Uncertainty in AI (UAI)*, pp. 33-42, Madison, USA.
- Box, G. P., G. M. Jenkins and G. C. Reinsel (1994). *Time Series Analysis Forecasting and Control*. Third Edition, Prentice Hall, San Francisco, USA.
- Byington, C., M. Roemer, G. Kacprzynski and T. Galie (2002). Prognostic Enhancements to Diagnostic Systems for Improved Condition-Based Maintenance. In: *2002 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, USA.
- Byington, C., M. Watson, M. Roemer and T. Galie (2003). Prognostic Enhancements to Gas Turbine Diagnostic Systems. In: *2003 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, USA.
- Byington, C., M. Roemer, M. Watson, T. Galie and C. Savage (2004). Prognostic Enhancements to Diagnostic Systems (PEDS) Applied to Shipboard Power Generation Systems. In: *ASME/IGTI Turbo Expo 2004-Power for Land, Sea, and Air*, Vienna, Austria.
- Carnero Moya, C. (2004). The control of the setting up of a predictive maintenance programme using a system of indicators. *Omega*, **32**(1), pp. 57-75.

- Cassandras, C. G. and S. Lafortune (1999). *Introduction to Discrete Event Systems*. Kluwer Academic Publishers, Boston, USA.
- Chelidze, D. and J.P. Cusumano (2004). A Dynamical Systems Approach to Failure Prognosis. *Journal of Vibration and Acoustics*, **126**(1), pp. 1-7.
- Christer, A. H. and W. Wang (1995). A simple condition monitoring model for a direct monitoring process. *European Journal of Operational Research*, **82**(2), pp. 258-269.
- Clarotti, C., A. Lannoy, S. Odin and H. Procaccia (2004). Detection of equipment aging and determination of the efficiency of a corrective measure. *Reliability Engineering and System Safety*, **84**(1), pp. 57-64.
- Coccozza-Thivent, C. (1997). *Processus stochastiques et fiabilité des systèmes*. Collection Mathématiques and Applications, Springer, Paris.
- Coit, D. and J. English (1999). System Reliability Modeling Considering the Dependence of Component Environmental Influences. In: *1999 Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, pp. 214-218, Washington, USA.
- Collas, D. (2002). Les apports du MES dans la gestion de l'entreprise et de la Supply Chain. In: *Conférence "Le contrôle de la production dans l'Entreprise Réactive de l'ère Internet"*, Nice, France.
- Combeau, J.L. (2002). *Situation et tendances de l'évolution de la maintenance chez les donneurs d'ordres industriels*. Etude réalisée en 2002 par l'ADEPA sous l'égide du Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie, avec le concours de L'AFNOR, l'AFIM et du CNMI.
- Corset, F., G. Celeux and A. Lannoy (2003). Introduction du retour d'expérience dans les réseaux bayésiens. In: *5^{ème} Congrès International Pluridisciplinaire Qualité et Sécurité de Fonctionnement*, Nancy, France.
- Cowing, M., E. Paté-Cornell and P. W. Glynn (2004). Dynamic modeling of the tradeoff between productivity and safety in critical engineering systems. *Reliability Engineering and System Safety*, **86**(3), pp. 269-284.
- Crespo Marquez, A., A. Sánchez Heguedas and B. Iung (2005). Monte Carlo-based assessment of system availability. A case study for cogeneration plants. *Reliability Engineering and System Safety*, **88**(3), pp. 273-289.
- Cuignet, R. (2002). *Management de la maintenance : améliorez les performances opérationnelles et financières de votre maintenance*. Dunod, Paris.
- David, M. (2004). *Définition d'un cadre pour l'organisation et l'évaluation des activités du travail coopératif*. Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I.
- Dean, T. and K. Kanazawa (1989). A model for reasoning about persistence and causation. *Computational Intelligence*, **5**, pp. 142-150.
- Dekker, R. (1996). Applications of maintenance optimization models : a review and analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, **51**, pp. 229-240.
- Dekker, R., P.A. Scarf (1998). On the impact of optimisation models in maintenance decision making: the state of the art. *Reliability Engineering and System Safety*, **60**, pp. 111-119.
- Denoeux, T., M.H. Masson and B. Dubuisson (1997). Advanced Pattern Recognition Techniques for System Monitoring and Diagnosis: A Survey. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, **31**(9-10), pp. 1509-1540.

- De Souza, E. and P. M. Ochoa (1992). State space exploration in markov models. *Performance Evaluation Review*, **20**(1), pp. 152-166.
- Djurdjanovic, D., J. Lee and J. Ni (2003). Watchdog Agent, an infotronics-based prognostics approach for product performance degradation assessment and prediction. *Advanced Engineering Informatics*, **17**(3-4), pp. 109-125.
- Doyen, L. and O. Gaudoin (2004). Classes of imperfect repair models based on reduction of failure intensity or virtual age. *Reliability Engineering and System Safety*, **84**(1), pp. 45-56.
- Dubuisson, B (1990). *Diagnostic et reconnaissance des formes*. Hermès, Paris.
- Ducq, Y., L. Berrah and O. Sénéchal (2003). *L'évaluation des performances des systèmes de production : évolution et enjeux*, chapitre 1 du livre Evaluation des performances des systèmes de production (Traité IC2, série Productique) sous la direction de C.Tahon.
- Dugan, J.B., S. Bavuso and M. Boyd (1992). Dynamic fault-tree models for fault-tolerant computer systems, *IEEE Transactions on Reliability*, **41**(3), pp. 363-377.
- Dulmet, M. and F. Lhote (2001). Analyse et caractérisation des couplages entre processus dans les systèmes de production automatisés. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, **35**(10), pp. 1193-1214.
- Dutuit, Y., E. Châtelet, J.-P. Signoret and P. Thomas (1997). Dependability modelling and evaluation by using stochastic Petri nets: application to two test cases. *Reliability Engineering and System Safety*, **55**(2), pp. 117-124.
- El Aoufir, H. and D. Bouami (2003). Place des modèles d'optimisation dans le processus d'aide à la décision en maintenance. *Revue française de gestion industrielle*. **22**(3), pp. 61-76.
- El Khattabi, S. (1993). *Intégration de la surveillance de bas niveau dans la conception des systèmes à événements discrets : application aux systèmes de production flexibles*. Doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille.
- Faddy, M. J. and R. J. Wilson (2000). Compartmental modelling of equipment subject to partial repair. *Mathematical and Computer Modelling*, **31**(10-12), pp. 115-120.
- Finkelstein, M.S. (1999). Wearing-out of components in a variable environment. *Reliability Engineering and System Safety*, **66**(3), pp. 235-242.
- Fitch, J. C. (1996). *Oil Analysis and Proactive Maintenance, Seminar Course Book*, Diagnostics.
- Francstel, J. C. (1999). *La fonction maintenance. De l'expression à la satisfaction du besoin*. AFNOR Editions, Paris.
- François, O. and P. Leray (2004). Etude comparative d'algorithmes d'apprentissage de structure dans les réseaux bayésiens. *Journal électronique d'intelligence artificielle*, **5**(39), pp.1-19.
- Frelicot, C. (1996). A fuzzy-based adaptive prognostic system. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, **30**, pp. 281-299.
- Fricks R. and K. Trivedi (1997). Modeling Failure Dependencies in Reliability Analysis Using Stochastic Petri Nets, In: *European Simulation Multi-conference (ESM '97)*, Istanbul.
- Fung, R. and K-C. Chang (1989). Weighing and integrating evidence for stochastic simulation in Bayesian networks. In: *Uncertainty in Artificial Intelligence 5*, pp. 209-219, Elsevier Science Publishing Company, New York.
- Gana, K. (1987). *Suivi d'évolution et aide au pronostic en maintenance de système industriel*. Doctorat de l'Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrais.

- Gélinier, O., F-X. Simon, J-P. Billard *et al.* (2002). *Développement durable : pour une entreprise compétitive et responsable*, Collection essais de la CEGOS, ESF édition, Paris.
- Getan, E. (1994). *Une contribution à la Productique : modélisation de données pour la maintenance intégrée des systèmes automatisés de production*. Doctorat de l'Ecole Centrale de Paris.
- Grall, A., C. Bérenguer and L. Dieulle (2002). A condition-based maintenance policy for stochastically deteriorating systems. *Reliability Engineering and System Safety*, **76**, pp. 167-180.
- Gouyon, D. (2004). *Contrôle par le produit des systèmes d'exécution de la production : apport des techniques de synthèse*. Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I.
- Greitzer, F. and A. Pawlowski (2002). Embedded Prognostics Health Monitoring. In: *48th Annual Instrumentations, Systems, and Automation Society International Instrumentation Symposium*, San Diego, USA.
- GT MACOD (2003). Présentation du groupe de travail : Modélisation et optimisation de la MAintenance COopérative et Distribuée (MACOD) au GDR MACS. *Journées du Pôle STP*, Nantes, France.
- Hadden, G. D., P. Bergstrom, B. H. Bennett, G. J. Vachtsevanos and J. Van Dyke (2002). Distributed Multi-Algorithm Diagnostics and Prognostics for US Navy Ships. In: *2002 AAAI Spring Symposium*, Stanford University, Palo Alto, USA.
- Hall, P.L. and J. E. Strutt (2003). Probabilistic physics-of-failure models for component reliabilities using Monte Carlo simulation and Weibull analysis: a parametric study. *Reliability Engineering and System Safety*, **80**(3), pp. 233-242.
- Halpin, T.A. (1998). Object-Role Modelling (ORM/NIAM), in Chapter 4 of *Handbook on Architectures of Information Systems*, Springer-Verlag, Berlin.
- Hamilton, J. D. (1989). A new approach to the economic analysis of nonstationary time series and the business cycle. *Econometrica*, **57**, pp. 357-384.
- Hao, J. P., Y. Yu and Q. Xue (2002). A maintainability analysis visualization system and its development under the AutoCAD environment. *Journal of Materials Processing Technology*, **129**(1-3), pp. 277-282.
- Hardman, A., A. Hess and R. Ahne (2001). USN Development Strategy, Fault Testing Results, and Future Plans for Diagnostics, Prognostics and Health Management of Helicopter Drive Train Systems. In: *International Conference on Health and Usage Monitoring*, Melbourne, Australia.
- Harrath, Y., B. Chebel-morello and N. Zerhouni (2003). Ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance systématique dans un Job Shop Approche génétique Pareto optimale. Maîtrise du compromis production/maintenance. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, **37**(5) pp. 621-640.
- Heckerman, D. and D. Geiger (1995). Learning Bayesian Networks. In: *Ninth Annual Conference on Neural Information Processing Systems*, Denver, USA.
- Hogan, R., T. Cesarone and D. Dragun (2003). Battle Group Automated Maintenance Environment. In *13th Annual International Ship Control Systems Symposium Explores Automation in Ship Control*, Philadelphia, USA.
- Hollocks B. W., H. T. Goranson, D. N. Shorter and F. B. Vernadat (1997). Assessing Enterprise Integration for Competitive Advantage. *Workshop 2, Working Group 1 in Enterprise Engineering and Integration: Building International Consensus* (K. Kosanke, J.G. Nell eds.), pp. 96-107, Springer-Verlag, Berlin.

- Iung, B., E. Muhl, J.-B. Léger and G. Morel (1999). MAS modelling paradigm application for the development of a proactive maintenance intelligent system. In: *1st IFAC-MAS'99 Workshop on Multi-Agent-Systems in Production*, pp. 89-96, Vienna, Austria.
- Iung, B., E. Neunreuther and G. Morel (2001). Engineering Process of Integrated - Distributed Shop Floor Architecture based on Interoperable Field Components. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, **14**(3), pp. 246-262.
- Iung, B., G. Morel and J.-B. Léger (2003). Proactive maintenance strategy for harbour crane operation improvement. *Robotica*, **21**, pp. 313-324.
- Iung, B. (2003). From remote maintenance to MAS-Based E-maintenance of an industrial process. *Journal of Intelligent Manufacturing*, **14**(1), pp. 59-82.
- Isermann, R. And P. Ballé (1996). Trends in the application of model based fault detection and diagnosis of technical processes. In: *13^{ème} IFAC World Congress*, Elsevier Science.
- ISO (2003). *Normes ISO/TC108/SC5 Surveillance et diagnostic des machines tournantes*, en cours de rédaction.
- Janssen, J., A. Blasi and R. Manca (2002). Discrete Time Homogeneous and non-Homogeneous semi-Markov Reliability Models. In: *Third international conference on mathematical methods in reliability (MMR 2002)*, Trondheim, Norway.
- Jardine, A. and D. Banjevic (2004). Interpretation of inspection data emanating from equipment condition monitoring tools: Method and Software. In: *Fourth International Conference on Mathematical Methods in Reliability Methodology and Practice*. Santa Fe, USA.
- Jensen, F. (2001). *Bayesian Networks and Decision Graphs*. Springer Verlag, New York.
- Jollivet, M. (2001). *Le développement durable, de l'utopie au concept*. De nouveaux chantiers pour la recherche, Elsevier/Natures Sciences et Sociétés, Paris.
- Jouffe, L. (2002). Nouvelle classe de méthodes d'apprentissage de réseaux bayésiens. In: *Journées francophones d'Extraction et de Gestion des Connaissances (EGC)*, Montpellier, France.
- Kacprzynski, G. J, M. J. Roemer, G. A. Modgil, A. Palladino and K. Maynard (2002). Enhancement of Physics-of-Failure Prognostic Models with System Level Features. *2002 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, USA.
- Kaffel, H. (2001). *La maintenance distribuée : concept, évaluation et mise en œuvre*. Doctorat de l'Université de Laval, Québec.
- Kahn, J. (2003). Overview of MIMOSA and the Open System Architecture for Enterprise Application Integration. In: *COMADEM 2003*, pp. 661-670, Växjö University, Sweden.
- Knezevic, J. (1987). Condition parameter based approach to calculation of reliability characteristics. *Reliability Engineering*, **19**(1), pp. 29-39.
- Koç, M. and J. Lee (2001). A system framework for next-generation E-maintenance system. In: *2nd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, Tokyo, Japan.
- Koç, M., J. Ni, J. Lee and P. Bandyopadhyay (2003). Introduction of e-Manufacturing. In: *31st North American Manufacturing Research Conference (NAMRC)*, Hamilton, Canada.
- Kopnov, V. A. (1999). Optimal degradation processes control by two-level policies. *Reliability Engineering and System Safety*, **66**(1), pp. 1-11.

- Küssel, R., V. Liestmann, M. Spiess and V. Stich (2000). "TeleService" a customer-oriented and efficient service ? *Journal of Materials Processing Technology*, **107**(1-3), pp. 363-371.
- Lauritzen, S. and D. Spiegelhalter (1988). Local computations with probabilities on graphical structures and their application to expert systems. *J. Royal Statistical Society*, **50**, pp. 157-224.
- Lawley, H. G. (1974). Operability Studies and Hazard Analysis. *Chemical Engineering Progress*, **70**, pp. 105-116.
- Lebold, M. and M. Thurston (2001). Open Standards for Condition-Based Maintenance and Prognostic Systems. *5th Annual Maintenance and Reliability Conference (MARCON 2001)*, Gatlinburg, USA.
- Lebold, M., K. Reichard and D. Boylan (2003). Utilizing DCOM in an Open System Architecture framework for Machinery Monitoring and Diagnostics. In: *2003 IEEE Aerospace Conference*, pp. 1227-1236, Big Sky, USA.
- Lee, J. (1996). Measurement of machine performance degradation using a neural network model. *Computer in Industry*, **30**, pp. 193-209.
- Lee, J. (1998). Teleservice engineering in manufacturing: challenges and opportunities. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **38**(8), pp. 901-910.
- Lee, J. and J. Ni (2002). An Introduction of Embedded Infotronics Agent for Tether-Free Prognostics. In: *AAAI conference on Information Refinement and Revision for Decision Making: Modeling for Diagnostics, Prognostics, and Prediction*, Stanford University, Palo Alto, USA.
- Lee, J. (2003). E-manufacturing: fundamental, tools, and transformation. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **19**(6), pp. 501-507.
- Lee, J. (2004). Infotronics-Based Intelligent Maintenance System and its Impacts to Closed-Loop Product Life Cycle Systems. *Keynote speech of IMS'2004 "International Conference on Intelligent Maintenance Systems"*, Arles, France.
- 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.
- Léger, J.-B and G. Morel (2001). Integration of maintenance in the enterprise: towards an enterprise modelling-based framework compliant with proactive maintenance strategy. *Production Planning and Control*, **12**(2), pp. 176-187.
- Léger, J.-B. (2003). La Sûreté Industrielle, la Maintenance Prévisionnelle et les NTIC : innovation du progiciel CASIP et perspectives de développement. In: *PENTOM'03, colloque francophone sur les performances et nouvelles technologies en maintenance*, Valenciennes, France.
- Léger, J.-B. (2004). A case study of remote diagnosis and e-maintenance information system. *Keynote speech of IMS'2004 "International Conference on Intelligent Maintenance Systems"*, Arles, France.
- Lemoigne, J.L (1997). *La théorie du Système Général, Théorie de la Modélisation*. Presses Universitaires de France, Paris.
- Lhoste, P. (1994). *Contribution au génie automatique : concepts, modèles, méthodes et outils*. Habilitation à diriger des recherches, Université Henri-Poincaré, Nancy I.
- Limnios, N. (2001). *Semi-Markov processes and reliability*, Birkhauser, Boston.
- Lind, M. (1994). Modeling goals and functions of complex industrial plant. *Applied Artificial Intelligence*, **8**, pp. 259-283.

- Lindemann, C. (1998). *Performance Modelling with Deterministic and Stochastic Petri Nets*. John Wiley and Sons, New York, USA.
- Lucas, P. (2001). Bayesian model-based diagnosis. *International Journal of Approximate Reasoning*, **27**(2), pp. 99-119.
- Luo, J., M. Namburu, K. Pattipati, L. Qiao, M. Kawamoto and S. Chigusa (2003). Model-based prognostic techniques. In: *AUTOTESTCON 2003*, California, USA.
- Makis, V. and A. Jardine (1992). Optimal Replacement in the Proportional Hazards Model. *Information Systems and Operational Research*, **30**(1), pp. 172-183.
- Malhotra, M. and A.L. Reibman (1993). Selecting and implementing phase approximations for semi-Markov models, *Stochastic Models*, **9**(4), pp. 473-506.
- Manian, R., J. Dugan, D. Coppit and K. Sullivan (1998). Combining various solution techniques for dynamic fault tree analysis of computer systems. In: *Third IEEE International High-Assurance Systems Engineering Symposium*, pages 21-28, Washington, USA.
- Marseguerra, M., E. Zio, J. Devooght and P. E. Labeau (1998). A concept paper on dynamic reliability via Monte Carlo simulation. *Mathematics and Computers in Simulation*, **47**(2-5), pp. 371-382.
- Marseguerra, M., E. Zio and L. Podofillini (2004). A multiobjective genetic algorithm approach to the optimization of the technical specifications of a nuclear safety system. *Reliability Engineering and System Safety*, **84**(1), pp. 87-99.
- Martinez, M. T., P. Foulletier, K. H. Park and J. Favrel (2001). Virtual enterprise - organisation, evolution and control. *International Journal of Production Economics*, **74**(1-3), pp. 225-238.
- Martorell, S., A. Sanchez and V. Serradell (1999). Age-dependent reliability model considering effects of maintenance and working conditions. *Reliability Engineering and System Safety*, **64**(1), pp. 19-31.
- Mateos, J. (2000). La traçabilité, un moyen pour des objectifs. In: *Seconde conférence SEE/BBF-ISA*, Hôtel Méridien Part-Dieu, Lyon, France.
- Mathur, A., K. Cavanaugh, K. Pattipati, P. Willet and T. Galie (2001). Reasoning and Modeling Systems in Diagnosis and Prognosis. In: *SPIE Aerosense Conference*, Orlando, USA.
- 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.
- Meeker, W.Q. and L. A. Escobar (1998). *Statistical Methods for Reliability Data*. Wiley series in probability and statistics, applied probability and statistics section, John Wiley and Sons, New York, USA.
- Meinadier, J.P. (1998). *Ingénierie et intégration des systèmes*, Hermès publications, Paris.
- Meng, H. C. and K. C. Ludema (1995). Wear models and predictive equations: their form and content. *Wear*, **181-183** (2), pp. 443-457.
- Mijailovic, V. (2003). Probabilistic method for planning of maintenance activities of substation components. *Electric Power Systems Research*, **64**(1), pp. 53-58.
- Mitchell, J., T. Bond, K. Bever and N. Manning (1998). MIMOSA - Four Years Later. *Sound and Vibration*, November 1998, pp. 12-21.

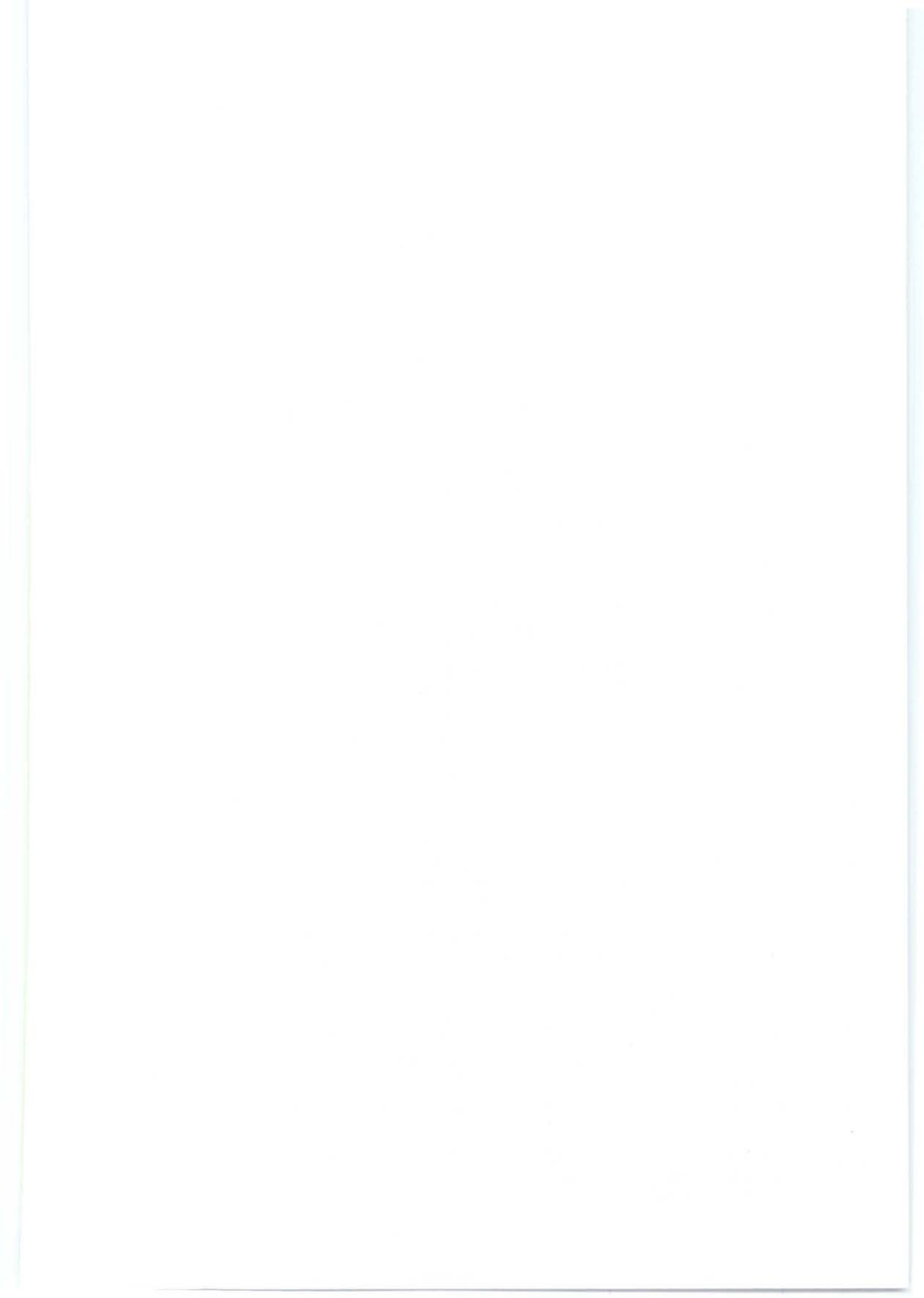
- Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance*. 2nd edition, Plant engineering, Butterworth Heinemann. USA.
- Morley, C. (2000). Changement organisationnel et modélisation des processus. In: *5ème colloque de l'Association Information et Management (AIM2000)*, Montpellier, France.
- Morris, C. (1999). Proactive Maintenance: You Can Bank on it. Midwest Editor, publication: *Food Engineering*, magazine Issue Date: 08/01/1999.
- Muller, A., M.-C. Suhner and B. Iung (2003). Développement d'un processus de pronostic par combinaison d'approches probabilistes et événementielles. In: *Journées Doctorales d'Automatique (JDA'03)*, Valenciennes, France.
- Muller, A., M.-C. Suhner and B. Iung (2004a). Probabilistic vs. dynamical prognosis process-based e-maintenance system. In: *IFAC-INCOM'04 - Information Control in Manufacturing*, Salvador, Brasil.
- Muller, A., M.-C. Suhner and B. Iung (2004b). Bayesian network based proactive maintenance. In: *Seventh Int. Conf. on Probabilistic Safety Assessment and Management, PSAM 7 and ESREL'04*, Berlin, Germany.
- Muller, A., M.-C. Suhner and B. Iung (2004c). Maintenance alternative integration to prognosis process for system performance optimization-oriented decision-making. In: *International conference of intelligent maintenance systems (IMS'2004)*, Arles, France.
- Muller, A., M.-C. Suhner, B. Iung and G. Morel (2004d). Prognosis-based Maintenance Decision-making for Industrial Process Productivity and Dependability Optimization. In: *7th IFAC Symposium on Cost Oriented Automation (COA2004)*, Gatineau/Ottawa, Canada.
- Muppala, J. K. and K. S. Trivedi (1995). System dependencies in Markov Dependability Modelling. In: *Fault-Tolerant Systems and Software, FTS-95*, pp. 38-47, Narosa Publishing House, New Delhi, India.
- Murphy, K.P.(2002). *Dynamic Bayesian Networks : Representation, Inference and Learning*. PhD Thesis of the University of California, Berkeley.
- Neapolitan, R.E. (2003). *Learning Bayesian Networks*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Neunreuther, E. (1998). *Contribution à la Modélisation des Systèmes Intégrés de Production à Intelligence Distribuée : Application à la distribution de la Commande et de la Gestion Technique sur les équipements de terrain*. Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I.
- Neuts, M. F. (1981). *Matrix-Geometric Solutions in Stochastic Models: An Algorithmic Approach*. The Johns Hopkins University Press, Baltimore, USA.
- Nourelfath, M. (1997). *Extension de la Théorie de la Supervision à la Surveillance et à la Commande des Systèmes à Événements Discrets : Application à la Sécurité Opérationnelle des Systèmes de Production*. Doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Noyes, D. and F. Pérès (1998). Maintenance Strategies Integrated into Production Management: towards Performance Optimisation. In: *IFAC-INCOM'98 - Information Control in Manufacturing*, Nancy-Metz, France.
- O'Cinneide, C.A. (1999). Phase-type distributions: open problems and a few properties. *Stochastic Models*, **15**, pp. 731-757.
- Parida, A. and U. Kumar (2004). Managing Information is key to Maintenance effectiveness. In: *International conference of intelligent maintenance systems (IMS'2004)*, Arles, France.

- Pearl, J. (1988). *Probabilistic reasoning in intelligent systems: Networks of plausible inference*. Morgan Kaufmann Publishers, San Mateo, CA.
- Pérès, F., D. Noyes and C. Reyterou (2004). Methodology of integration of the new information and communication technologies in a maintenance process: application to aeronautic field. In: *International conference of intelligent maintenance systems (IMS'2004)*, Arles, France.
- Pillay, A. and J. Wang (2003). Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning. *Reliability Engineering and System Safety*, **79**(1), pp. 69-85.
- Pham, H. and H. Wang (1996). Imperfect maintenance. *European Journal of Operational Research*, **94**(3), pp. 425-438.
- Portinale, L., A. Bobbio and S. Montani (2004). From AI to Dependability: Using Bayesian Networks for Reliability Modeling and Analysis. In: *Fourth International Conference on Mathematical Methods in Reliability (MMR2004)*, Santa Fe, USA.
- Procaccia, H. and M.-C. Suhner (2003). *Démarche Bayésienne et Applications à la Sûreté de Fonctionnement*. Lavoisier/Hermès, Paris.
- Provan, G. (2003). Prognosis and condition-based monitoring: an open systems architecture. In: *5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, pp. 57-62, Washington, USA.
- Przytula, W. and D. Thompson (2000). Construction of Bayesian Networks for Diagnostics. In: *IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, USA.
- Rafiq, I., M. Chryssanthopoulos and T. Onoufriou (2004). Performance updating of concrete bridges using proactive health monitoring methods. *Reliability Engineering and System Safety*, **86**(3), pp. 247-256.
- Ragot, J., M. Darouach, D. Maquin and G. Bloch (1990). *Validation de données et diagnostic*. Hermès, Traité des Nouvelles Technologies, série Diagnostic et Maintenance, Paris.
- Ramos, G. (2004). Mathematics modeling of the behavior in operation of induced draft fans for 350-MW Fossil Power Units to predict its optimum maintenance time. *Electric Power Systems Research*, **70**(2), pp. 109-113.
- Rankly, P. (1986). *Computer-Integrated Manufacturing*. Prentice-Hall, Ed. Englewood Cliffs, New Jersey, USA.
- Ray, A. (1999). Stochastic Modeling of Fatigue Crack Damage for Risk Analysis and Remaining Life Prediction. *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, **121**(3), pp. 386-393.
- Reynaud, E. (2003). Développement durable et entreprise : vers une solution symbiotique ? *Journée AIMS, Atelier Développement durable*, Angers.
- Reyterou, C. and F. Pérès (2001). Les Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication au service de l'amélioration des processus de maintenance aéronautique : formulation d'une problématique. In: *MOSIM'01*, Troyes, France.
- Roesch, M., C. Laurent, G. Morel and P. Lhoste (1984). Grafset et surveillance automatique d'une installation, détection et gestion de défauts. In: *Automation 84*, Paris.
- Rouvroye, J. L. and E. G. Van den Blik (2002). Comparing safety analysis techniques. *Reliability Engineering and System Safety*, **75**(3), pp. 289-294.

- Rose, B. (2004). *Proposition d'un référentiel support à la conception collaborative : CO²MED (Collaborative CONflict Management in Engineering Design), Prototype logiciel dans le cadre du projet IPPOP*. Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy I.
- Saranga, H. and J. Knezevic (2001). Reliability prediction for condition-based maintained systems. *Reliability Engineering and System Safety*, **71**(2), pp. 219-224.
- Scarf, P. (1997). On the application of mathematical models in maintenance. *European Journal of Operational Research*, **99**(3), pp. 493-506.
- Schoenig, R. (2004). *Définition d'une méthodologie de Conception des Systèmes Mécatroniques Sûrs de Fonctionnement*. Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine.
- Sénéchal, O. (2003). *Actes de PENTOM'03, colloque francophone sur les performances et nouvelles technologies en maintenance*. Presses universitaires de Valenciennes.
- Sénéchal, O. (2004). *Pilotage des systèmes de production vers la performance globale*. Habilitation à diriger les recherches, Université de Valenciennes et du Hainaut Cambrésis (UVHC).
- Serquin, Y. and F. Beaudouin (1996). Les modèles d'optimisation des décisions de maintenance : une évaluation critique. In: *10^{ème} colloque Lambda-mu (Maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement)*, Saint Malo, France.
- Smit, K. and W. Slaterus (1992). *Information Model for Maintenance Management*. Cap Gemini Publishing, The Netherlands. Traduit en français par M. Sperry, Gestion de l'information pour le management de la maintenance - Le modèle MIMM. AFNOR, Paris.
- Sofres (2003). *Le développement durable*. Etude réalisée auprès d'un panel de cadres dirigeants, analystes financiers et investisseurs, relais d'opinion dans 6 pays européens. TNS SOFRES - Corporate.
- Sommerhalter, B. and D. Sauvage (2004). Stochastic Process for Aeronautical Design and Maintenance Optimization. In: *Seventh Int. Conf. on Probabilistic Safety Assessment and Management, PSAM 7 and ESREL'04*, Berlin, Germany, 2004.
- Sourisse, C. and F. Klaye (1999). *Management des moyens de production : efficacité, disponibilité, rentabilité*. Hermès, Paris.
- Suhner, M.-C. (1994). *Utilisation de l'analyse bayésienne pour optimiser la démarche fiabilité. Application à l'automobile. Intégration au cycle de vie du produit et généralisation à la maintenance des équipements*. Doctorat de l'Université Henri-Poincaré, Nancy I.
- Sutherland, H., T. Repoff, M. House and G. Flickinger (2003). Prognostics : A New Look at Statistical Life Prediction for Condition-Based Maintenance. In: *2003 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, USA.
- Swanson, D. (2001). A general prognostic tracking algorithm for predictive maintenance. In: *IEEE International Conference on Aerospace*, **6**, pp. 2971-2977.
- Tahon, C. (2003). *Evaluation des performances des systèmes de production*. Hermès, Paris.
- Talbi, A., A. Hammouche and C. Tahon (2003). Méthode intégrée de planification des tâches de production. *Revue française de gestion industrielle*, **22**(3), pp. 39-60.
- Thurston, M. and M. Lebold (2001). Open System Architecture for Condition Based Maintenance OSA/CBM. In: *IEEE "Systems Readiness Technology Conference" AUTOTESTCON*, Valley Forge, USA.
- Toguyeni, A. (1992). *Surveillance et Diagnostic en ligne dans les ateliers flexibles de l'industrie manufacturière*. Doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille.

- Triantaphyllou, E., B. Kovalerchuk, L. Mann and G. M. Knapp (1997). Determining the Most Important Criteria in Maintenance Decision Making. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 3(1), pp.16-28.
- UE - Union européenne (2001). Recommandation de la Commission du 30 mai 2001 concernant la prise en considération des aspects environnementaux dans les comptes et rapports annuels des sociétés : inscription comptable, évaluation et publication d'informations". *Journal officiel des Communautés européennes*, C(2001) 1495.
- Van Noortwijk, J. M. and H. E. Klatte (2004). The use of lifetime distributions in bridge maintenance and replacement modelling. *Computers and Structures*, 82(13-14), pp. 1091-1099.
- Vassiliadis, C. and N. Pistikopoulos (2001). Maintenance scheduling and process optimization under uncertainty. *Computers and Chemical Engineering*, 25(2-3), pp. 217-236.
- Vernadat, F.B. (2000). Enterprise modeling and integration: current status and research perspectives. In: *IFAC/ IEEE/INRIA International Conference on Manufacturing Control and Production Logistics (MCPL'2000)*, Grenoble, France.
- Vieille, J. (2000). Regard S88/S95 sur les cycles de vie du système de production, *J'automatise*, 9.
- Villemeur, A. (1988). *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels*. Collection de la direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, Eyrolles, France.
- Vlok, P., J. Coetzee, D. Banjevic, A. Jardine and V. Makis (2003). Optimal component replacement decisions using vibration monitoring and the proportional-hazards model. *Journal of the Operational Research Society*, 53, 193-202.
- Von Bertalanffy, L. (1973). *Théorie Générale des Systèmes*. Dunod, Paris.
- Volovoi, V. (2005). Frameworks for System-Dependability Modeling. To be published in *IEEE Transactions on Reliability*.
- Waeyenbergh, G. and L. Pintelon (2004). Maintenance concept development: A case study. *International Journal of Production Economics*, 89(3), pp. 395-405.
- Walliser, B. (1977). *Systèmes et modèles. Introduction critique à l'analyse de systèmes*. Editions du Seuil, Paris.
- Wang, P. and G. Vachtsevanos (1999). Fault prognosis using dynamic wavelet neural networks. *Maintenance And Reliability Conference (MARCON 99)*, Gatlinburg, USA.
- Wang, W., F. Golnaraghi and F. Ismail (2003). A robust prognostic system for real-time industrial applications. In: *4th International Conference on Industrial Automation*, Montreal, Canada.
- Wang, X., G. Yu, M. Koç and J. Lee (2002). Wavelet Neural Network for Machining Performance Assessment and Its Implications to Machinery Prognostics. In: *Managing Innovative Manufacturing "e-Manufacturing and e-Business Integration" (MIM'2002)*, Milwaukee, USA.
- WCED (1987). *Our Common Future*. Final report of the World Commission on Environment and Development (WCED), Oxford University Press, Oxford.
- Weber, P., M.-C. Suhner and B. Iung (2001). System Approach-Based Bayesian Network to aid Maintenance of Manufacturing Process. In: *6th IFAC Symposium on Cost Oriented Automation*, Berlin, Germany.
- Weber, P. and M.-C. Suhner (2002). An application of bayesian networks to the performance analysis of a process. In: *13th European Safety and Reliability International Conference, ESREL-λμ 2002*, Lyon, France.

- Weber, P. and L. Jouffe (2003). Reliability modelling with dynamic bayesian networks. In: *5th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety of Technical Processes*, pp. 57-62, Washington, USA.
- Weber, P., P. Munteanu and L. Jouffe (2004). Dynamic Bayesian Networks modelling the dependability of systems with degradations and exogenous constraints. In: *11th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*, Salvador, Brasil.
- Weber, P. and L. Jouffe (2005). Complex system reliability modelling with Dynamic Object Oriented Bayesian Networks (DOOBN). To be published in *Reliability Engineering and System Safety*.
- Weinstein, L. and C. H. Chung (1999). Integrating maintenance and production decisions in a hierarchical production planning environment. *Computer and Operations Research*, **26**, pp. 1059-1074.
- Welch, R. and T. Thelen (2000). Dynamic Reliability Analysis in an Operational Context: The Bayesian Network Perspective. In: *Dynamic Reliability: Future Directions, 4th Workshop on Dynamic Reliability*, pp. 277-307.
- Yan, J., J. Lee and M. Koç (2002). Predictive Algorithm for Machine Degradation Detection Using Logistic Regression. In: *Managing Innovative Manufacturing "e-Manufacturing and e-Business Integration" (MIM'2002)*, Milwaukee, USA.
- Yang, S. K. (2002). An experiment of state estimation for predictive maintenance using Kalman filter on a DC motor. *Reliability Engineering and System Safety*, **75**(1), pp. 103-111.
- Yu, R., B. Iung and H. Panetto (2003). A multi-agents based E-maintenance system with case-based reasoning decision support. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, **16**, pp. 321-333.
- Zanakis, S., A. Solomon, N. Wishart and S. Dubliss (1998). Multi-attribute decision making: A simulation comparison of select methods. *European Journal of Operational Research*, **107**(3), pp. 507-529.
- Zemouri, R. *et al.* (2002). Réseaux de neurones récurrents à fonctions de base radiales : RRFR, Application à la détection dynamique de pannes. In: *Journées de travail du GRP - Groupe de Travail Automatisation et Systèmes Sûrs de Fonctionnement*, Grenoble, France.
- Zemouri, R. (2003). *Contribution à la surveillance des systèmes de production à l'aide des réseaux de neurones dynamiques : Application à la e-maintenance*. Doctorat de l'Université de Franche-Comté.
- Zwingelstein, G. (1995). *Diagnostic des défaillances - théorie et pratique pour les systèmes industriels*. Hermès, Traité des Nouvelles Technologies, série Diagnostic et Maintenance, Paris.



Notations

Notations

- **Analyse fonctionnelle**

Processus : *Processus*

Flux : *Flux*

Fonction : *Fonction*

Finalité : *Finalité*

Support : *Support*

- **Analyse dysfonctionnelle**

Mode de dégradation/défaillance : "Mode de dégradation" / "Mode de défaillance"

Attribut de flux : "Attribut"

Déviaton : DEVIATION

Relation causale : Cause → Conséquence

- **Modélisation de la dynamique**

Processus de détérioration : {Processus de détérioration}

Matrice de passage : P_X

Espace d'états : χ^X

- **Modélisation probabiliste (RBD)**

Variable dynamique : $X_i[k]$ Nœuds dynamiques : X_i et $X_i[k-1]$

Variable statique : X_j Nœud statique : X_j

Arc : $[X \rightarrow Y]$

Table de probabilités conditionnelles : θ_X

Temps : t

- **Modélisation événementielle**

Indicateur de dégradation : Z_X

Intervention de maintenance sur un composant : Intervention_{composant}

CH. P. NARCY
BIBLIOTHEQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique
54600 VILLERS-LES-NANCY

Monsieur Alexandre MULLER

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ HENRI POINCARÉ, NANCY-I

en Automatique, Traitement du Signal et Génie Informatique

VU, APPROUVÉ ET PERMIS D'IMPRIMER N° 1068

Nancy, le 27 juin 2005

Le Président de l'Université



Jean-Marie FINANCE

Contribution à la maintenance prévisionnelle des systèmes de production par la formalisation d'un processus de pronostic

Résumé : L'émergence du concept de « durabilité » en entreprise oblige dorénavant les industriels à intégrer dans leur stratégie de développement, au-delà de la finalité économique habituelle, de nouvelles préoccupations sociales et environnementales. Cet enjeu majeur se décline, au niveau du système d'exécution de la production, par le concept de maintien en conditions opérationnelles (MCO) qui met en oeuvre un ensemble de moyens logistiques et de processus, dont le processus pivot de maintenance, principal levier pour agir sur la performance globale du système de production. Cette performance est d'autant plus difficile à maîtriser que l'évolution continue de l'environnement, le vieillissement des composants... modifient sans cesse les caractéristiques du système à maintenir en opérationnalité. Le MCO doit donc évoluer vers de nouvelles formes plus coopératives et plus proactives. Cette évolution se traduit pour le processus de maintenance par le déploiement d'un Système Intégré de Maintenance Prévisionnelle (SIMP). Cependant, la mise en oeuvre du SIMP dans un cadre industriel complexe et bien que facilitée à l'heure actuelle par le développement des NTIC, reste délicate à réaliser à cause du manque d'outils/méthodes pour la modélisation et l'intégration de ses processus fondamentaux. En ce sens, notre contribution porte sur la formalisation du processus clé de la maintenance prévisionnelle : le pronostic. La démarche de modélisation proposée s'appuie sur le couplage d'une représentation probabiliste de l'état d'un système basée sur le formalisme des Réseaux Bayésiens Dynamiques (RBD), et d'une approche événementielle de la surveillance de la dégradation de ses composants. La mise en oeuvre du processus de pronostic sur le système de Déroulage / Pressage de la plate-forme TELMA démontre la faisabilité de la méthodologie proposée aussi bien d'un point de vue « construction des modèles », que d'un point de vue « intégration du processus de pronostic ».

Mots clés : Maintenance, E-Maintenance, Maintenance prévisionnelle, Pronostic, Dégradation, Surveillance, Approche processus, Analyse dysfonctionnelle, Réseau bayésien dynamique.

Contribution to the proactive maintenance of manufacturing system: formalisation of the prognosis process

Abstract: Today, due to the emergence of "sustainability" constraint within Enterprise, the industrial people have to integrate in the development strategy, not only the conventional economical finality but also the social and environmental requirements. At the Manufacturing Execution System (MES) level, this objective is materialised through the concept of "System Maintaining in Operational Conditions" (SMOC). SMOC implements a set of logistics means and processes in which the key maintenance process directly acting on the global performance of the system. The global performance is difficult to be controlled because the environment changes, the ageing of the components... modify continually the system characteristics to be maintained in operational conditions. Thus, SMOC must evolve to new more co-operative and proactive forms. It means for the Maintenance process to be deployed by means of Integrated System for Predictive Maintenance (ISPM). Nevertheless the ISPM development within an industrial framework, although facilitated now by the IT use, remains difficult due to the lack of methods/tools for the modelling and integration of its fundamental processes. In that way, our contribution is related to the formalisation of the key Predictive Maintenance process which is the prognosis one. The deployment of the prognosis process follows a methodology based both of probabilistic and event approaches. The probabilistic model which supports the prognosis execution, has been developed by means of Dynamic Bayesian Networks. The feasibility and added value of this new prognosis is experimented on the manufacturing TELMA platform supporting the unwinding of metal bobbin.

Keywords: Maintenance, E-maintenance, Proactive Maintenance, Prognosis, Degradation, Monitoring, Process approach, Dysfunctional analysis, Dynamic Bayesian Network.