

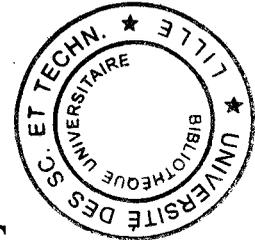
UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

N° d'ordre : 2521

Année : 1999

THESE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE*Discipline* : Productique, Automatique et Informatique Industrielle

Présentée et soutenue publiquement le

Le 21 mai 1999

Par

Fatime LY*Ingénieur Ecole Polytechnique de Thiès (Sénégal)*

**CONTRIBUTION PAR LA SURVEILLANCE PREDICTIVE
INDIRECTE A L'OPTIMISATION DE LA MAINTENANCE DANS LES
SYSTEMES FLEXIBLES DE PRODUCTION MANUFACTURIERE**

JURY

M. E. CRAYE	Examineur	Professeur à l'Ecole Centrale de Lille
M. J.C. GENTINA	Examineur	Professeur à l'Ecole Centrale de Lille, Président
M. A. E. K. SAHRAOUI	Rapporteur	Professeur IUT-B, Université de Toulouse le Mirail
Mme Z. SIMEU-ABAZI	Rapporteur	Maître de Conférences – HDR à l'Institut des Sciences et Techniques de Grenoble de l'Université Joseph Fourier (ISTG-UJF)
M. A. K. A. TOGUYENI	Examineur	Maître de Conférences à l'Ecole Centrale de Lille
M. M. STAROSWIECKI	Examineur	Professeur à l'Université de Lille I

Directeurs de thèse : E. CRAYE, A.K.A. TOGUYENI

Thèse préparée au Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille (L.A.I.L. UPRESA CNRS 8021 - Ecole Centrale de Lille)

Tables des matières

ABREVIATIONS	6
---------------------------	----------

INTRODUCTION GENERALE	7
------------------------------------	----------

PREMIERE PARTIE : LA PROBLEMATIQUE DE LA MAINTENANCE DANS LES SYSTEMES FLEXIBLES DE PRODUCTION MANUFACTURIERE.....	11
---	-----------

INTRODUCTION	12
---------------------------	-----------

Chapitre 1 : La Maintenance, Présentation générale	13
---	-----------

1. INTRODUCTION	14
------------------------------	-----------

2. QUELQUES DEFINITIONS.....	15
-------------------------------------	-----------

3. TERMINOLOGIE ET APPROCHES DANS LE CADRE DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT	16
--	-----------

3.1. L'approche hors ligne	17
----------------------------------	----

3.2. L'approche en ligne.....	17
-------------------------------	----

4. LES DIFFERENTES STRATEGIES DE MAINTENANCE [Monchy 88]	17
---	-----------

4.1. La Maintenance Corrective	18
--------------------------------------	----

4.1.1. La Maintenance Palliative.....	18
---------------------------------------	----

4.1.2. La Maintenance Curative.....	18
-------------------------------------	----

4.2. La Maintenance Préventive	18
--------------------------------------	----

4.2.1. La Maintenance Préventive Systématique	19
---	----

4.2.2. La Maintenance Prédictive	19
--	----

5. LES MATERIELS CONCERNES.....	20
--	-----------

6. LES DIFFERENTES ACTIVITES DE LA MAINTENANCE	21
---	-----------

6.1. La Surveillance	21
----------------------------	----

6.1.1. Les activités de surveillance ponctuelles et régulières.....	21
---	----

6.1.2. Les activités de surveillance spécifiques : La Surveillance Prédictive	22
---	----

6.2. La gestion des activités de maintenance	23
--	----

6.2.1. La gestion des tâches de maintenance.....	23
--	----

6.2.2. La gestion des équipements	24
---	----

6.2.3. La gestion des stocks	25
------------------------------------	----

6.2.4. La gestion technique du personnel [Monchy 88].....	25
---	----

6.2.5. La Maintenance Assistée par Ordinateur (MAO).....	26
--	----

7. ETAT DE L'ART SUR LES APPROCHES ORGANISATIONNELLES DE LA MAINTENANCE	28
7.1. Approche du LIISI (Laboratoire d'Ingénierie Intégrée des Systèmes Industriels).....	28
7.2. Approche du LAAS (Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes).....	30
7.3. L'approche du CRAN (Centre de Recherche en Automatique de Nancy).....	34
8. ETAT DE L'ART SUR LES APPROCHES STRATEGIQUES	39
8.1. Approche du LAG (Laboratoire d'Automatique de Grenoble).....	39
8.2. Approche du LAMIH (Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielle et Humaine).....	42
9. CONCLUSION	44

Chapitre 2 : Maintenance et Contrôle / Commande des SFPM 46

1. INTRODUCTION	47
2. DEFINITION PRELIMINAIRES : NOTIONS DE FLEXIBILITES.....	48
3. ORGANISATION DU contrôle/COMMANDE D'UN SFPM.....	51
3.1. Définition du contexte : l'approche CASPAIM II.....	51
3.1.1. La Planification/Ordonnancement	52
3.1.1.1. L'approche cyclique	52
3.1.1.2. L'approche réactive	52
3.1.1.3. L'approche dynamique	53
3.1.2. La Supervision	55
3.1.2.1. Le Pilotage	55
3.1.2.2. La Gestion des Modes.....	55
3.1.2.3. La Surveillance	56
3.1.2.3.1. La Surveillance de la commande.....	56
3.1.2.3.2. La Surveillance du procédé : la Surveillance Curative.....	56
3.1.2.4. Le Recouvrement	58
3.1.3. La Commande.....	58
3.2. Proposition de structuration pour une maintenance intégrée.....	59
3.2.1. La Surveillance Prédictive	60
3.2.1.1. La Surveillance Prédictive Directe.....	60
3.2.1.2. La Surveillance Prédictive Indirecte [<i>Ly 98a</i>], [<i>Ly 98b</i>]	61
3.2.2. La Maintenance.....	61
4. PROPOSITION DE STRUCTURATION DE LA MAINTENANCE DANS LE CADRE DES SFPM	62
4.1. La Fonction Décision.....	63
4.2. La Fonction Organisationnelle	63
4.3. La Fonction Opérationnelle	64
5. APPROCHE EN LIGNE DE LA MAINTENANCE.....	65
5.1. Flux d'informations échangés entre la Maintenance et les autres fonctions du Contrôle/Commande ..	66
5.1.1. Maintenance et Planification/Ordonnancement	66
5.1.2. Maintenance et Surveillance	68
5.1.2.1. Maintenance et Surveillance Curative.....	68
5.1.2.2. Maintenance et Surveillance Prédictive	68
5.1.3. Maintenance et Supervision	69
5.1.3.1. Maintenance et Pilotage	69
5.1.3.2. Maintenance et Gestion des Modes.....	69
5.1.3.3. Maintenance et Recouvrement.....	69
5.2. Flux d'informations entre les différentes fonctions de la Maintenance.....	71
5.2.1. Décision et Fonction Organisationnelle	71
5.2.2. Fonction Organisationnelle et Fonction Opérationnelle	71
5.2.3. Décision et Fonction Opérationnelle.....	72

6. CONCLUSION.....	72
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE	75
DEUXIEME PARTIE : LA MAINTENANCE, APPROCHE PAR LA SURVEILLANCE PREDICTIVE INDIRECTE.....	77
INTRODUCTION.....	78
Chapitre 3 : La Surveillance Prédicative Indirecte	79
1. INTRODUCTION.....	80
2. LA SURVEILLANCE PREDICTIVE INDIRECTE : APPROCHE QUANTITATIVE	81
2.1. Le Principe de la Surveillance Prédicative Indirecte.....	82
2.2. Hypothèses définissant le cadre de l'étude.....	83
2.3. La Détection	84
2.3.1. Le modèle de flux	85
2.3.2. Mesure du flux.....	86
2.3.2.1. Placement des capteurs	86
2.3.2.2. Mise en œuvre de l'acquisition des données.....	91
2.3.3. Le principe de la Détection.....	93
2.4. Le Diagnostic.....	98
2.4.1. Principe.....	98
2.4.2. Notions de défaillances induites	101
2.4.3. Règles de diagnostic	103
2.4.4. L'algorithme de diagnostic.....	105
2.5. Le Pronostic.....	105
2.5.1. Modélisation des machines et des robots.....	106
2.5.2. Modélisation des convoyeurs et des stocks.....	106
2.5.3. Modélisation des jonctions et des aiguillages.....	107
2.6. Principe de la propagation d'une dérive de flux	108
3. CONCLUSION.....	110
Chapitre 4 : Evaluation de la Surveillance Prédicative Indirecte et exploitation des résultats.....	112
1. INTRODUCTION.....	113
2. EVALUATION DE LA SURVEILLANCE PREDICTIVE INDIRECTE.....	113
2.1. Mise en œuvre de la simulation.....	114
2.1.1. Description du système de production.....	114
2.1.2. Objectifs de la simulation	115
2.1.3. Construction de la simulation	116
2.1.4. Les données de la simulation	117
2.1.4.1. Données sur le processus physique.....	117
2.1.4.1.1. Données sur les moyens de production.....	117

2.1.4.1.2. Données sur les moyens de transport	117
2.1.4.1.3. Données sur les pièces à fabriquer	118
2.1.4.1.4. Données sur les stocks	118
2.1.4.2. Données sur la conduite du système	118
2.1.4.2.1. Gestion des pièces	118
2.1.4.2.2. Pilotage du système	118
2.1.4.3. Données de l'acquisition	119
2.1.4.3.1. Définition des intervalles d'observation	119
2.1.4.3.2. Données sur les capteurs	119
2.1.4.3.3. Données sur le flux de production et le taux de dérive	120
2.2. Résultats de la simulation	120
2.2.1. Résultats de la Phase 1	120
2.2.2. Résultats de la Phase 2	120
2.2.2.1. Défaillances sur une seule gamme opératoire (Annexe 3)	121
2.2.2.1.1. M2 défaillante (Annexe 3.B, paragraphe 1)	122
2.2.2.1.2. M1 défaillante (Annexe 3.B, paragraphe 2)	122
2.2.2.1.3. M3 défaillante (Annexe 3.B, paragraphe 3)	123
2.2.2.2. Défaillances sur les trois gammes opératoires (Annexe 4)	124
2.2.2.2.1. M2 défaillante (Annexe 4.B, paragraphe 1)	125
2.2.2.2.2. M1 défaillante (Annexe 4.B, paragraphe 2)	127
2.2.2.3. Interprétation des résultats	129
2.3. Exploitation des résultats de la simulation	129
2.3.1. Le Diagnostic	129
2.3.2. Le Pronostic	130

3. PRISE EN COMPTE DES MARGES LORS DE LA DETECTION D'UNE DERIVE DE FLUX	134
3.1. Notions de marges du point de vue de l'approche cyclique	135
3.2. Notions de marges du point de vue de l'approche réactive	136
3.3. Notions de marges du point de vue de l'approche dynamique	137
3.4. Prise en compte des marges dans la détection	138

4. EXPLOITATION DES RESULTATS DE LA SURVEILLANCE PREDICTIVE INDIRECTE	141
4.1. Indicateurs de performances	141
4.1.1. Les données de production	142
4.1.2. Indicateurs de résultat	143
4.1.3. Indicateurs de processus	143
4.2. Les actions de correction	145
4.2.1. Les actions en ligne	145
4.2.1.1. D'un point de vue Production	145
4.2.1.2. D'un point de vue Maintenance	146
4.2.2. Les actions hors ligne	146
4.2.2.1. D'un point de vue Production	146
4.2.2.2. D'un point de vue Maintenance	147

5. CONCLUSION	148
----------------------------	------------

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE 151

CONCLUSION GENERALE 153

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 158

***ANNEXES* 166**

***LISTE DES FIGURES* 262**

***LISTE DES TABLEAUX*..... 264**

Abréviations

ADEMIS	Aide à la Définition et à la Mise en œuvre des Stratégies de maintenance
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillances de leurs Effets et de leur Criticité
CASPAIM	Conception Assistée de Systèmes de Production Automatisés en Industrie Manufacturière
GMAO	Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur
GO	Gamme opératoire
GPAO	Gestion de la Production Assistée par Ordinateur
MAO	Maintenance Assistée par Ordinateur
MCD	Modèle Conceptuel de Données
MDT	Mean Down Time
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTF	Mean Time To Failure
MTTR	Mean Time To Repair
MUT	Mean Up Time
PHAMED	Processus Hiérarchique Analytique pour la Décision Maintenance
SAP	Système Automatisé de Production
SdF	Sûreté de Fonctionnement
SFPM	Systèmes Flexibles de Production Manufacturière
SIAD	Système Interactif d'Aide à la Décision
SIMADM	Système Interactif Multicritère d'Aide à la Décision de Maintenance
TMAO	Technique de Maintenance Assistée par Ordinateur
XAO	Outils de Maintenance Assistée par Ordinateur

Introduction Générale

L'évolution actuelle des entreprises vers le juste à temps se traduit par des contraintes de plus en plus fortes qui visent l'élimination des excès et des rebuts, et à la maîtrise des variations de production (en quantité et en qualité). La Maintenance participe au respect de ces objectifs en garantissant la disponibilité et la qualité du service des équipements de production.

La Maintenance regroupe l'ensemble des activités (techniques et de gestion) destinées à maintenir ou à rétablir un équipement dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour réaliser sa fonction [Zwingelstein 95]. Au-delà de cet objectif purement technique, la Maintenance - tout particulièrement dans le cas des Systèmes Flexibles de Production Manufacturière (SFPM) - a pour objectif de diminuer les coûts de production et d'utilisation des équipements. La question que l'on se pose alors est de savoir quelle politique de maintenance il faut appliquer à ces systèmes pour répondre aux exigences de la production.

La Maintenance est d'autant plus efficace qu'elle sait gérer et coordonner toutes les activités qui lui incombent dans le cadre d'une politique de maintenance adaptée aux SFPM, en tenant compte de ses contraintes (techniques, économiques et de délais) et des objectifs de production (quantité, qualité et compétitivité). En effet, le coût de maintenance selon les types d'industries peut varier entre 15% (agro-alimentaire) et 40% (sidérurgie) du coût des biens produits [Mobley 90]. Pour les Etats-Unis, ceci correspond à plus de 200 milliards de dollars. Un tel enjeu économique a suscité beaucoup d'efforts pour minimiser cette charge financière.

De récentes études sur l'efficacité de la gestion en maintenance ont montré qu'un tiers des coûts de maintenance provient **d'opérations inutiles ou mal effectuées**. Cette inefficacité a pour raison principale l'absence d'informations réelles qui permettraient de déterminer les besoins immédiats en réparation ou en entretien. On pourrait aller plus loin en soulignant également l'absence d'une politique d'entreprise fédérant les activités des différents services, d'où la nécessité d'une communication plus étroite entre ces services.

Dans le cadre des SFPM, la diminution des coûts de maintenance et la prise en compte des objectifs de production passent par la définition d'une politique optimale de Maintenance adaptée aux exigences de ce type de système. Cette politique de maintenance optimale permet par une maintenance globale de prendre en compte les interactions entre les différentes ressources du système, et par une maintenance intégrée de garantir une meilleure synergie entre la Maintenance et les autres fonctions du Contrôle / Commande. Ces fonctions ont pour mission de définir la politique de production, de l'appliquer et de la sauvegarder en cas de dysfonctionnement, en accord avec la Maintenance.

Les travaux présentés dans ce mémoire traitent ces deux aspects dans les deux parties qui le composent.

Nous proposons dans la Première Partie d'étudier la problématique de la Maintenance dans les SFPM. Notre objectif est d'intégrer la Maintenance dans le Contrôle/Commande. Les différentes fonctions de la Maintenance sont définies ainsi que ses liens avec les autres fonctions qui sont : la Planification/Ordonnancement, la Supervision, et la Commande. L'approche du L.A.I.L. (Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle de Lille) sert de base à la structuration proposée.

L'approche du LAIL vise à travers le projet CASPAIM (Conception Assistée de Systèmes de Production Automatisés en Industrie Manufacturière) à définir une méthodologie de conception et d'implantation concernant l'activité de production. Le projet CASPAIM prenait initialement en compte les aspects de conception de la commande. Ce projet a ensuite évolué vers la prise en compte de l'évaluation des performances [Ohl 95], [Camus 97], [Korbaa 98] et de la gestion des modes [Bois 91], [Kermad 96]. Le besoin de contrôler l'évolution du procédé en phase d'exploitation a abouti au développement des modules Surveillance [Toguyeni 92], [Elkhatabi 93] et de Supervision [Berruet 98a]. L'association des outils et méthodes basés sur ces différentes approches a permis d'aboutir à la définition de modèles décrivant le Contrôle/Commande. Dans ce contexte, le rôle de la Maintenance se limite à agir sur le procédé après détection de défaillances. Les aspects préventifs de la maintenance ne sont pas pris en compte.

Nous sommes donc partis de ce cadre d'étude pour effectuer l'intégration de la Maintenance. Notre analyse a permis d'aboutir à une nouvelle configuration du Contrôle/Commande où la Maintenance ne se limite pas à la prévention et à l'élimination des défaillances, mais participe en temps réel à la définition et à la mise en œuvre des objectifs de production. Par ailleurs, la définition d'une politique globale de maintenance nous a conduit à développer une nouvelle approche de surveillance (Deuxième Partie) qui vient compléter les autres approches de surveillance qui existaient déjà.

La Deuxième Partie de ce mémoire est d'abord consacrée à la présentation d'une nouvelle approche de Surveillance Prédictive Indirecte qui participe à l'amélioration de la stratégie de Maintenance préventive (Chapitre 3) dans le cadre d'une approche globale de maintenance.

Les politiques de maintenance classiques prennent en compte les défaillances catalectiques par une surveillance dite curative [Toguyeni 92] et les défaillances progressives par une Surveillance Prédictive Directe. Cette dernière consiste à placer des capteurs sur les ressources critiques du système et à suivre leur état grâce à des paramètres significatifs de leur dégradation. C'est le cas par exemple de l'analyse vibratoire, de l'analyse d'usure, etc..

La Surveillance Prédictive Directe est facile à mettre en œuvre sur des équipements unitaires. Elle est plus difficile à appliquer à un système parce que non intégrée en phase de conception et très souvent coûteuse. Nous proposons donc une Surveillance Prédictive Indirecte.

L'objectif est de développer une stratégie de Maintenance Prédicative Indirecte permettant de garantir l'état des ressources en tenant compte des contraintes de production (quantité, qualité et délais).

La Surveillance Prédicative Indirecte permet de suivre les défaillances progressives sur la base d'une approche système par les produits. Comme son nom l'indique, cette approche tient compte des interactions entre les ressources pour aboutir à la fonction qu'elles délivrent, ce qui rejoint l'approche système classique. Elle ne se limite cependant pas à analyser la fonction, elle va plus loin en s'intéressant au service rendu par celle-ci. Ce service représente dans le cas des SFPM la fabrication des produits.

La mise en place d'une stratégie de Maintenance Prédicative basée sur la Surveillance Prédicative Indirecte permet donc de suivre l'état et le comportement du système sur la base d'un repère commun d'interprétation entre la Production et la Maintenance, ce sont les produits fabriqués. En effet, ils représentent aussi bien en terme de quantité que de qualité un moyen de suivi et d'évaluation des objectifs de production pour la Production, et d'analyse du comportement et des performances des ressources pour la Maintenance.

La fin de la Deuxième Partie du mémoire (Chapitre 4) est consacrée à l'évaluation de la Surveillance Prédicative Indirecte et à l'exploitation de ses résultats.

Etant donné que nous n'avons pas pu disposer de données réelles, nous les avons construites à partir d'une simulation. Sur la base de ces données, nous avons ensuite appliqué notre méthode de Surveillance Prédicative Indirecte.

Dans le cadre de l'exploitation des résultats, l'objectif est de montrer comment la Surveillance Prédicative Indirecte peut participer à l'amélioration des politiques de maintenance et de production qui sont établies. Les informations qu'elle apporte permettent ainsi de mener des actions de correction en ligne et hors ligne.

PREMIERE PARTIE :

***La Problématique de la
Maintenance dans les
Systèmes Flexibles de
Production Manufacturière***

Introduction

La maintenance d'un équipement (gestion au coût optimal de sa disponibilité) est devenue un enjeu clé de la productivité et de la compétitivité des systèmes de production actuels. La Maintenance doit être en mesure de s'organiser afin de répondre aux contraintes de production en terme de qualité du service délivré par les équipements, et de disponibilité. Pour cela, elle doit disposer de tous les outils nécessaires pour prendre "la bonne décision, dans le bon contexte et au bon moment".

La majeure partie des travaux menés dans le cadre de la Maintenance porte sur la définition des stratégies de maintenance, sur leur optimisation et leur évaluation, mais rarement sur la structuration de la fonction Maintenance. C'est ce dernier aspect que nous abordons dans la Première Partie de ce mémoire.

Le **Chapitre 1** présente d'abord des concepts généraux sur la Maintenance. Plus précisément sur les différentes stratégies de maintenance, les matériels qu'elle prend en compte, les activités correspondantes, et la manière dont celles-ci sont gérées. Cette maintenance classique est relativement déconnectée de l'exploitation. D'où d'importantes limites qui en découlent. Les deux derniers paragraphes du chapitre présentent l'état de l'art sur différents travaux effectués dans le cadre de la Maintenance. Les premiers portent sur l'organisation et l'intégration de la Maintenance dans le contrôle/commande des SFPM, tandis que les seconds visent par une approche stratégique à optimiser la Maintenance par la définition d'une politique globale prenant en compte les différents types de ressources qui composent un SFPM.

Le **Chapitre 2** présente le point de vue du L.A.I.L. pour ce qui concerne l'organisation du Contrôle /Commande d'un SFPM. Celui-ci sert de base à la structuration de la Maintenance que nous proposons ensuite. Dans ce cadre, les différentes fonctions de la Maintenance sont décrites ainsi que ses liens avec les autres fonctions du Contrôle/Commande. De plus l'aspect en ligne est complété par la prise en compte de la Maintenance Prédictive.

Chapitre 1 : La Maintenance, Présentation générale

1. INTRODUCTION

En phase d'exploitation, le choix des stratégies de maintenance à appliquer dépend de différents critères tels que le type de défaillance, l'occurrence de la défaillance, etc. Ainsi, les actions techniques à mener sont de natures différentes selon qu'il s'agit de défaillance, de panne ou de défaut.

Nous donnons dans le second paragraphe de ce chapitre quelques définitions sur les différents types d'événements qui caractérisent l'état et le mode de défaillance d'un équipement. Par une présentation succincte de la Sûreté de Fonctionnement dans le troisième paragraphe, nous analyserons les différentes méthodes permettant de prendre en compte les "défaillances", depuis la phase de conception jusqu'à la phase d'exploitation. Deux grandes approches se dégagent dans ce cadre : l'approche hors ligne et l'approche en ligne. Les différentes stratégies de maintenance seront présentées au quatrième paragraphe. Selon le mode d'apparition d'une défaillance ou d'une panne sur un type de matériel donné et ses effets, il y a un impact plus ou moins important sur le système. Une analyse des différents types de matériels qui composent le système ainsi que l'étude des différentes flexibilités de celui-ci permettent de prendre en compte l'ensemble des équipements du système dans les différentes stratégies de maintenance.

Les différentes activités de la Maintenance sont présentées au paragraphe 6. Elles sont regroupées en trois catégories : la surveillance, les interventions et la gestion des activités de la Maintenance que sont : les tâches de maintenance, les équipements, les stocks et le personnel.

Dans ce paragraphe nous montrerons l'intérêt lié au développement d'outils informatiques comme les TMAO et les GMAO.

Nous pensons qu'avant toute chose, il est important d'analyser les besoins de la Maintenance et de les organiser de manière à prendre en compte les besoins des autres secteurs de l'entreprise. Cet aspect est fondamental, et c'est seulement de cette manière que l'on pourra éviter les redondances et favoriser l'accès et l'exploitation des informations par tous les services. Dans les deux derniers paragraphes, nous présentons différents travaux sur la structuration et la définition des politiques de maintenance.

Deux familles d'approches se dégagent :

- Les approches organisationnelles qui s'intéressent à la définition et à la formalisation de la Maintenance. Les aspects informationnels et en ligne de la Maintenance y sont abordés.
- Les approches stratégiques quant à elles s'intéressent aux activités de la Maintenance qu'elles tentent d'optimiser par l'intégration des différentes stratégies de maintenance.

2. QUELQUES DEFINITIONS

La Maintenance prend en compte les différents concepts suivants dans des actions techniques spécifiques.

Le **défaut** ou **symptôme** [Villemeur 88] représente un écart entre une caractéristique réelle d'une entité et la caractéristique voulue, cet écart dépassant des limites d'acceptabilité.

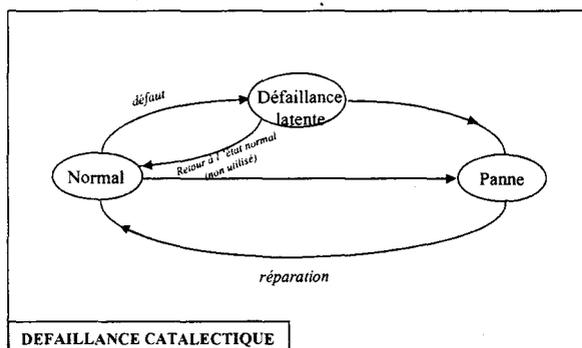
Un défaut dans le système n'affecte pas en général l'aptitude du système à accomplir une fonction requise. Par conséquent, on peut constater que le défaut ne conduit pas toujours à une défaillance. Il n'est perçu que lors de la sollicitation d'une fonction.

La **défaillance** est l'altération ou la cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise [AFNOR X 60]. Après défaillance complète d'une entité, celle-ci est en état de panne. La défaillance est un passage d'une entité d'un état de fonctionnement normal à un état de fonctionnement anormal qui se caractérise par un défaut.

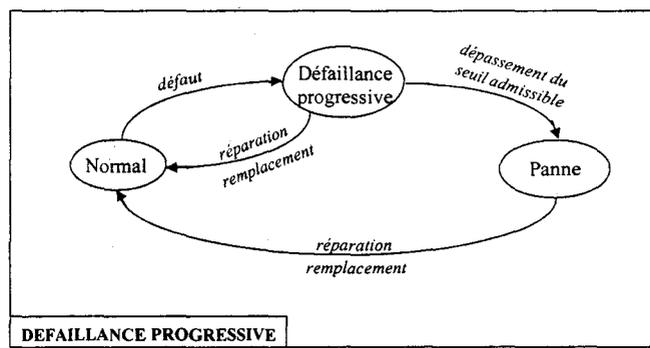
La **panne** représente la cessation de l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise [AFNOR X 60] ou à assurer le service approprié à la suite d'une défaillance.

Une panne est généralement la conséquence d'une défaillance ; néanmoins, elle peut exister sans défaillance préalable. La cause supposée d'une panne est un défaut physique ou une erreur humaine.

Les Figures 1.1a et 1.1b ci-dessous regroupent ces trois concepts suivant deux modes de défaillance : la défaillance catalectique qui est une défaillance soudaine et complète et la défaillance progressive. Ces deux modes de défaillance diffèrent principalement par leur rapidité et leur ampleur.



(a)



(b)

Figure 1-1 : Les différents états d'un équipement

Les notions de défaillance et de panne se traitent en fonction de leur gravité, de leur vitesse et de leur date d'apparition ou alors en fonction des conséquences qu'elles peuvent engendrer. Elles constituent un moyen de mise en œuvre de la Sécurité de Fonctionnement dans le système.

3. TERMINOLOGIE ET APPROCHES DANS LE CADRE DE LA SURETE DE FONCTIONNEMENT

La Sûreté de Fonctionnement (SdF) permet d'établir le degré de sûreté que l'on peut attribuer à un système dans le cadre de la mission qu'il doit assurer. Elle est également appelée Science des défaillances. Elle consiste à **connaître, évaluer, prévoir, mesurer, et maîtriser** les défaillances des systèmes [Zwingelstein 95]. Elle se caractérise par l'étude structurelle (statique) et dynamique des systèmes du point de vue prévisionnel, mais aussi opérationnel et expérimental (apprentissage pour la reconnaissance de signatures) en tenant compte des aspects probabilité et conséquences des défaillances.

La Sûreté de fonctionnement peut être caractérisée et quantifiée par les concepts et paramètres suivants [Laprie 95] :

- La **fiabilité** qui traduit l'aptitude d'un système à délivrer de façon continue un service ;
- La **disponibilité** qui traduit le fait qu'un système soit toujours prêt à l'utilisation ;
- La **maintenabilité** qui traduit l'aptitude d'un système à être rétabli dans un état de fonctionnement normal ;
- La **sécurité** qui traduit la non-occurrence de conséquences catastrophiques.

La prise en compte de ces concepts dans un système de production est faite à toutes les étapes de vie du système afin de garantir en phase d'exploitation ses meilleures performances.

Ainsi, le développement d'un système sûr de fonctionnement passe par l'utilisation combinée d'un ensemble de méthodes permettant entre autres, la prévention des défaillances, leur identification et leur maîtrise. Ces méthodes peuvent être classées en quatre catégories [Simeu-Abazi 98] :

- **Prévention des pannes** : c'est tout ce qui permet d'empêcher l'occurrence d'une panne. Des systèmes de surveillance et de maintenance préventive efficaces y contribuent. Ces méthodes interviennent en phase d'exploitation du système.
- **Tolérance aux défaillances** : ce sont des méthodes qui permettent en phase de conception, de proposer des architectures qui remplissent leur fonction en dépit des défaillances. Les techniques de tolérance aux pannes sont généralement fondées sur la redondance d'éléments dans le système. Au L.A.I.L., des méthodes d'analyse et de synthèse d'architectures tolérantes aux fautes sont développées en exploitant le Graphe d'Accessibilité Opérationnel du système [Berruet 98a].
- **Prévision des pannes** : ce sont des méthodes qui permettent une estimation de la présence d'une panne ainsi que leurs conséquences. Ces méthodes sont basées sur l'évaluation de paramètres caractéristiques de sûreté.

- **Elimination des pannes** : ce sont des méthodes qui permettent de réduire la présence des pannes en nombre et en sévérité. Elles permettent d'améliorer la sécurité d'un système.

Pour tout système et notamment les systèmes de production, une conception basée sur une évaluation rigoureuse des fonctions remplies par le système constitue un maillon essentiel qui vise au développement d'un système sûr de fonctionnement. Dans les travaux concernant la sûreté de fonctionnement des systèmes de production, suivant que l'on vise une étude du système au niveau conception ou au niveau exploitation, deux grandes approches complémentaires se dégagent : l'approche dite "hors ligne" et l'approche dite "en ligne".

3.1. L'approche hors ligne

L'approche hors ligne correspond à l'étude du système en phase de conception. Les travaux développés concernent l'analyse des propriétés d'une structure d'atelier en terme de flexibilité et de tolérance, la validation de modèles, l'évaluation des indicateurs de performance et de sûreté, l'étude des différents modes de marche, etc.

Pour la phase d'exploitation (phase qui nous intéresse plus précisément ici), l'approche hors ligne apporte dans le cadre de la Maintenance, une analyse prévisionnelle fondée sur des études statistiques (à partir des MTBF) passant par une connaissance du vécu du système ou au moins de ses composants. En pratique différentes méthodes d'analyse comme l'AMDEC (Analyse des Modes de Défaillances de leurs Effets et de leur Criticité) ou la construction d'arbres de défaillances peuvent être utilisées.

L'analyse des paramètres de l'historique technique du système permet également d'améliorer les différentes stratégies de maintenance.

3.2. L'approche en ligne

L'approche en ligne correspond à l'étude du système en phase d'exploitation. Les travaux développés concernent la surveillance et la supervision d'atelier. La particularité de cette approche réside dans le fait que les échanges de données sont effectués en temps réel ; L'objectif final étant l'exploitation sûre d'un système de production.

L'approche en ligne se concrétise dans le cadre de la Maintenance par des activités de surveillance qui permettent de suivre l'état de certaines ressources du système.

4. LES DIFFERENTES STRATEGIES DE MAINTENANCE [MONCHY 88]

On distingue globalement deux catégories de maintenance : la Maintenance Corrective et la Maintenance Préventive. On retrouve à partir de ces deux catégories, différentes stratégies de maintenance plus ou moins orientées vers les types de défaillances citées au paragraphe 2.

4.1. La Maintenance Corrective

C'est une opération de maintenance effectuée après la détection d'une défaillance [AFNOR X 06] et destinée à remettre une entité dans un état lui permettant d'accomplir une fonction requise, au moins provisoirement. Les défaillances dites catalectiques sont prises en compte dans le cadre de la Maintenance Corrective.

Les actions de Maintenance Corrective s'effectuent selon les étapes :

- Test : comparaison des mesures avec une référence ;
- Détection : déceler l'apparition d'une défaillance ;
- Localisation : déterminer les éléments par lesquels la défaillance se manifeste ;
- Diagnostic : analyse des causes de la défaillance ;
- Dépannage, réparation : remise en état (avec ou sans modification) ;
- Contrôle : contrôle du bon fonctionnement ;
- Amélioration éventuelle : éviter la réapparition de la panne ;
- Historique : mise en mémoire de l'intervention pour une exploitation ultérieure.

La Maintenance Corrective regroupe deux types de maintenance : la **Maintenance Palliative** et la **Maintenance Curative**.

4.1.1. La Maintenance Palliative

Elle correspond à des activités de dépannage permettant à une entité d'accomplir provisoirement tout ou partie d'une fonction requise. Etant entendu que ces actions sont suivies d'actions curatives.

4.1.2. La Maintenance Curative

Elle correspond à des activités de réparation permettant de rétablir un matériel ou une entité dans un état spécifié ou de lui permettre d'accomplir une fonction requise. Le résultat des activités réalisées doit présenter un caractère permanent.

4.2. La Maintenance Préventive

C'est une opération de maintenance subordonnée à un type d'événement prédéterminé (autodiagnostic, information donnée par un capteur, mesure d'une usure, ...) révélateur de l'état de dégradation d'un bien [AFNOR X 06].

Lorsqu'elle est réalisée à des intervalles prédéterminés, on parle de **Maintenance Préventive Systématique**.

Lorsqu'elle est effectuée sur la base de critères prescrits, suite à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs, elle est nommée **Maintenance Préventive Conditionnelle** ou **Maintenance Prédictive**. Le terme de "Maintenance Prédictive" n'est pas normalisé mais il est utilisé pour caractériser les prévisions de maintenance en fonction :

- de la tendance d'évolution d'un dysfonctionnement détecté,
- de l'estimation du temps de fonctionnement correct qui subsiste.

La Maintenance préventive Conditionnelle est destinée à réduire la probabilité de panne d'une entité. Elle admet toutefois que l'entité puisse continuer à travailler en dépit de l'occurrence de défaillances progressives, et tant que celles-ci n'ont pas atteint les limites spécifiées.

L'intervention préventive sert à améliorer l'état de l'élément. Par conséquent, les défaillances progressives sont prises en compte ici. Une politique de maintenance préventive a pour objectifs :

- de réduire les coûts de défaillance,
- d'augmenter la fiabilité d'un équipement,
- d'améliorer la disponibilité du système,
- d'augmenter la durée de vie efficace d'un équipement,
- d'améliorer l'ordonnancement des travaux,
- de faciliter la gestion des stocks,
- d'assurer la sécurité,
- etc.

4.2.1. La Maintenance Préventive Systématique

C'est une opération de maintenance préventive effectuée conformément à un échéancier établi selon le temps, le nombre de cycles de fonctionnement, le nombre de pièces produites ou un nombre prédéterminé d'usages pour certains équipements (révisions périodiques) ou organes sensibles (graissage, étalonnage, etc.). Aucune intervention n'a lieu avant l'échéance prédéterminée.

L'inconvénient d'une telle stratégie est qu'elle repose sur l'hypothèse "MTBF constant", ce qui veut dire "Taux de défaillance constant". Alors qu'un équipement vieillit, ce qui se traduit par le fait que le MTBF décroît.

4.2.2. La Maintenance Prédictive

C'est une opération de maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (auto-diagnostic, information d'un capteur, mesure, etc.) ou à l'analyse de l'évolution surveillée de paramètres significatifs de la dégradation et de la baisse de performance d'une entité.

Cela permet d'optimiser (en "retardant" mais également en "avançant" le cas échéant) et de planifier les interventions. L'événement considéré permet de fixer un seuil d'alarme. Le principal intérêt d'une telle stratégie est de pouvoir utiliser les entités au maximum de leur possibilité mais aussi de diminuer le nombre d'opérations de maintenance corrective.

Contrairement à la Maintenance Corrective, les activités de la Maintenance Prédictive sont principalement basées sur des activités de surveillance.

Le schéma de la Figure 1.2 présente les différentes stratégies de maintenance définies précédemment.

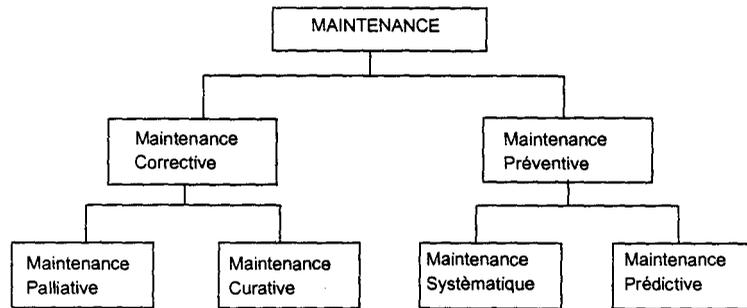


Figure 1-2 : Les différentes stratégies de maintenance.

Une analyse détaillée [Zwingelstein 96] de l'ensemble des équipements du système permet de choisir les différentes stratégies de maintenance qui leur seront appliquées. Cette analyse permet de les classer suivant l'impact de leur défaillance sur le système de production.

5. LES MATERIELS CONCERNES

Tous les matériels ne nécessitent pas les mêmes soins préventifs. On les répertorie en quatre catégories [Cetim 95] :

- En catégorie A se classent les matériels dont l'arrêt provoque celui de la production et qui ont une influence certaine sur les coûts de maintenance (voir la notion d'opération critique introduit dans [Berruet 98b]),
- En catégorie B, les matériels dont la dégradation provoque un ralentissement de la production ou une baisse de la qualité (ce sont ces matériels qui nous intéresseront dans la Deuxième Partie),
- En catégorie C, les matériels pour lesquels la fabrication dispose de pièces de rechange ; leurs arrêts ne jouent pas directement sur les quantités produites mais affectent les coûts de maintenance,
- En catégorie D, les matériels ne nécessitant pas de maintenance (exemple le graissage à vie de certains roulements de moteur).

Les matériels de catégorie A sont bien sûr les premiers à considérer. Une méthodologie de conception intégrée des SFPM doit permettre, par le choix d'une architecture matérielle appropriée, d'éliminer tous les matériels de la catégorie A.

Les différentes stratégies de maintenance appliquées aux catégories de matériel que nous venons de citer déterminent les différentes activités de la Maintenance. Celles-ci portent sur le

suivi, la remise en état et la gestion technique de ces matériels et du personnel chargé d'y intervenir.

6. LES DIFFERENTES ACTIVITES DE LA MAINTENANCE

Le mot maintenance nous fait souvent penser à des actions de "réparation" à effectuer sur une entité défaillante. En fait, la Maintenance est de plus en plus appelée à gérer des tâches bien plus complexes, par exemple la surveillance de certains éléments "critiques" du système. A cela, s'ajoutent des tâches de gestion de ses activités, et de prise de décision sur la base des résultats obtenus par la surveillance, les contraintes de production et les données historiques.

On peut diviser les activités de la Maintenance en trois catégories : des activités de surveillance, des activités de maintenance regroupant toutes les tâches de maintenance qu'on peut qualifier d'"interventions", et des activités de gestion technique et administrative (des équipements, des tâches de maintenance, du matériel de maintenance, des stocks de pièces de rechange, et du personnel de maintenance).

6.1. La Surveillance

Dans le cadre de la surveillance des équipements de production, la Maintenance comporte deux types d'activités préventives participant au bon fonctionnement de l'ensemble : on distingue les **activités ponctuelles et régulières**, et les **activités de suivi prolongé** par des méthodes de surveillance spécifiques principalement basées sur une acquisition de données par des capteurs.

6.1.1. Les activités de surveillance ponctuelles et régulières

Elles correspondent à des activités de maintenance systématique. On distingue [Zwingelstein 95] :

- Le **Contrôle** qui consiste en la vérification de la conformité par rapport à des données préétablies, suivie d'un jugement. On peut citer l'exemple du contrôle de la température d'un moteur. Cette tâche peut plus ou moins être automatisée.
- Les **Essais** ou **tests opérationnels** recouvrent les activités visant à s'assurer que le matériel fonctionne sans pour autant vérifier que les paramètres quantitatifs sont satisfaits. La vérification visuelle du démarrage d'un moteur électrique après son branchement permet de s'assurer qu'il n'est pas défaillant. Mais cet essai ou test opérationnel ne permettra en aucun cas d'assurer que le moteur électrique fournit sa puissance nominale dans un temps donné.
- Les **Essais** ou **tests fonctionnels** correspondent aux activités qui ont pour objectif de vérifier que le matériel concerné remplit sa fonction avec ses caractéristiques associées dans des conditions données d'exploitation. Dans le cas du moteur électrique cité en exemple

précédemment, les mesures du couple et du temps de montée en vitesse sont des exemples d'essais fonctionnels.

- Les **Tests pour la recherche de défaillances cachées** : En présence des systèmes redondants, et en particulier pour leurs matériels redondants qui ne sont pas actifs, les tests pour la recherche de défaillances cachées correspondent à des essais fonctionnels particuliers permettant de s'assurer qu'en cas de défaillance du matériel en marche, les matériels redondants seront aptes à remplacer la fonction perdue par le matériel défaillant.
- L'**Inspection** : C'est une activité de surveillance qui s'exerce dans le cadre d'une mission définie. Elle ne se limite pas obligatoirement à la comparaison avec des données préétablies. On peut prendre l'exemple d'un examen visuel ou recourant à des moyens non destructifs, utilisés par exemple pour évaluer l'état des structures métalliques.
- Les **Essais en exploitation** : Ils constituent une tâche de mesure de l'aptitude du matériel à assurer ses fonctions ou son niveau de performance, dans des conditions d'exploitation normales ou accidentelles. C'est le cas par exemple du contrôle de la calibration d'un capteur.
- La **Visite** : C'est une opération de maintenance préventive consistant en un examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou partie (visite limitée) des différents éléments du bien. Elle peut impliquer des opérations de maintenance de premier niveau (réglages simples).
- La **Révision** : C'est l'ensemble des actions d'examens, de contrôle et des interventions effectuées en vue d'assurer l'équipement contre toute défaillance majeure ou critique pendant un temps donné ou pour un nombre d'unités d'usage donné. On peut citer l'exemple de la révision d'un groupe électrogène d'alimentation électrique de secours.

6.1.2. Les activités de surveillance spécifiques : La Surveillance Prédictive

La Surveillance Prédictive consiste à mesurer de manière périodique ou en continu, des paramètres décrivant au mieux l'état d'un équipement afin de déterminer le moment où il faudra en effectuer la réparation. Contrairement à la Maintenance Préventive Systématique, cette décision de maintenance n'est pas basée sur des données statistiques ou historiques, mais sur les données réelles et actuelles de l'équipement, obtenues grâce à des mesures.

Nous verrons au Chapitre 2 que dans le cas des systèmes de production, la Maintenance n'a pas seulement une mission de maintenance ; elle a également celle de "production" en ce sens qu'au lieu d'agir a posteriori, elle participe a priori à l'accomplissement des objectifs de production. Cette mission se concrétise par une prise en compte de l'impact réel d'une défaillance ou d'une dégradation sur le système. Notre démarche dans le cadre de la Surveillance Prédictive est d'analyser l'état d'un équipement de manière directe par une

Surveillance Prédictive Directe, et de manière indirecte par une **Surveillance Prédictive Indirecte**. Cette dernière approche fera l'objet de la Deuxième Partie de ce mémoire.

La **Surveillance Prédictive Directe** regroupe l'ensemble des activités de suivi "direct", par des capteurs spécifiques, des paramètres significatifs de la dégradation d'une ressource. Ces mesures sont généralement réalisées par :

- Analyse vibratoire (exemple : les machines tournantes) ;
- Thermographie (exemple : les contacteurs électriques) ;
- Analyse des huiles (exemple : les éléments mécaniques des machines tournantes) ;
- Analyse ultrasonore (exemple : les fissures) ;
- etc.

La **Surveillance Prédictive Indirecte** regroupe l'ensemble des activités de suivi "indirect" par les perturbations notées sur les produits ou sur d'autres variables du procédé (par exemple la puissance électrique consommée), de paramètres significatifs de la dégradation et de la baisse de performance d'une ressource. La dégradation d'une ressource se répercute sur les produits qu'elle fabrique ou transporte.

Des **interventions** sur le système sont menées suite à ces activités de surveillances. Ces interventions peuvent être de différents niveaux [AFNOR 84] et solliciter des ressources matérielles et humaines qui dépendent de l'activité à mener.

6.2. La gestion des activités de maintenance

6.2.1. La gestion des tâches de maintenance

Planifier et mettre en œuvre les différentes activités de la Maintenance nécessite un minimum d'organisation. En effet, les tâches de la maintenance relatives à chacune de ses activités (surveillance et intervention) sont multiples. Il faut pour chacune d'elles :

- créer un plan de maintenance,
- planifier les différentes tâches à réaliser à une date donnée,
- préparer les matériels (les capteurs et les appareils de mesure pour la surveillance, les pièces de rechange et les outillages pour les interventions),
- déclencher l'exécution des tâches,
- analyser les résultats,
- remettre à jour l'historique technique et les stocks de pièces de rechange,
- prendre des décisions relatives aux résultats de la surveillance (fixation de dates de maintenance prédictive, changement de méthode de surveillance, poursuite des mesures, etc.),
- etc.

Les seuils d'admissibilité au-delà desquels un arrêt pour maintenance préventive s'impose sont réajustés et réadaptés dans le temps en tenant compte, comme nous l'avons déjà noté de l'utilisation qui est faite du matériel (niveau de qualité de l'exploitation, fréquence d'exploitation).

L'ensemble de ces actions "alimente" le plan de maintenance [Cetim 95]. Ce plan n'est pas figé mais doit "vivre". Il doit donc être tenu à jour en fonction des changements affectant les matériels et des observations faites au cours des interventions.

6.2.2. La gestion des équipements

Pour toutes les activités de Maintenance citées précédemment, une bonne connaissance du matériel est nécessaire. Les matériels concernés sont localisés, classés et codifiés suivant certains critères [Monchy 88].

La classification permet de distinguer les équipements généraux (installations) des équipements techniques. Ces derniers peuvent être divisés en deux groupes :

- Les matériels périphériques constitués par les équipements annexes (générateurs d'énergie, véhicules, outillages, engins de manutention, équipements de stockage, etc.) et les aménagements (canalisations, lignes électriques, chauffage, etc.) ;
- Et les équipements de production sur lesquels notre intérêt porte essentiellement. Il s'agit principalement des machines outils, robots et systèmes de transport dans le cas des usines manufacturières.

La codification du matériel se fait à partir d'un inventaire qui établit par exemple une logique de mise en familles arborescentes. Cela permet la gestion économique et technique du service par la possibilité d'imputation des défaillances et des coûts à des secteurs, à des types de machines, à des sous-ensembles fragiles, etc. Cela permet également d'intégrer ces informations dans un système informatique en vue d'évaluer le plus rapidement possible l'impact de la défaillance d'un équipement appartenant à une catégorie donnée sur la production et ensuite de définir une stratégie de "compensation" en accord avec les autres services concernés (cf. Chapitre 2 sur les liens entre la Maintenance et les autres fonctions du Contrôle/Commande).

Le schéma de la Figure 1.3 ci-dessous donne un exemple d'inventaire et de codification du matériel [Monchy 88].

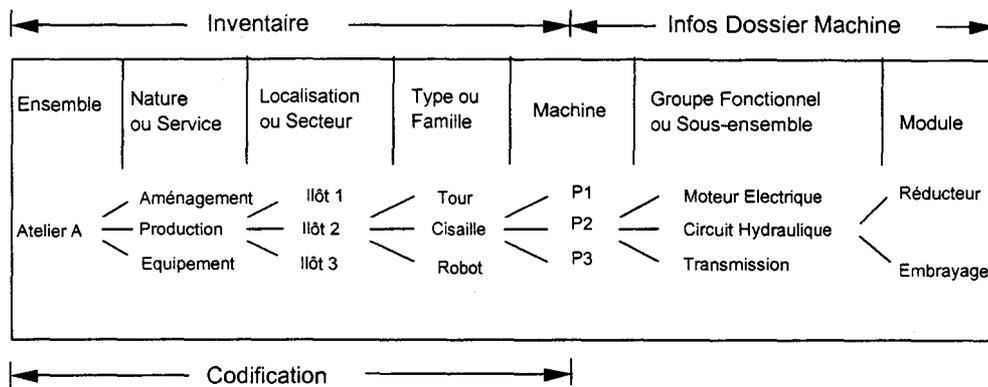


Figure 1-3 : Exemple de codification

Pour faciliter la gestion des équipements, on regroupera sous le même code des matériels ayant des fonctions semblables ou des durées de fonctionnement communes (par exemple des mises en route et arrêts simultanés). Une partie des informations de l'inventaire (Figure 1.3) provient du dossier machine.

6.2.3. La gestion des stocks

Il existe deux modèles de magasins dans les entreprises [Monchy 88] :

- Centralisé : un "magasin général" fournit tous les services. Il est géré par les achats.
- Décentralisés : plusieurs magasins sont rapprochés des services utilisateurs. Ils peuvent être gérés indépendamment par chaque service ou à gestion centralisée. Lorsqu'ils sont à gestion centralisée, l'informatique à travers la MAO (paragraphe 6.2.5) est seule capable de faire face aux nombreux besoins de la Maintenance.

Toute opération est enregistrée sur un document (Demande d'Achat ou Bon de sortie Magasin) ; tout document est entré en ordinateur, contrôlé et stocké immédiatement ; toute pièce sortie du magasin reçoit une étiquette.

L'objectif d'une gestion informatisée est de disposer d'une information en temps réel permettant de faire face à toute demande urgente, et de pouvoir évaluer les délais d'approvisionnement en cas de non-disponibilité d'un équipement.

Un autre objectif non moins important est la gestion des coûts.

6.2.4. La gestion technique du personnel [Monchy 88]

Les principales informations traitées ici dans le cadre des interventions concernent :

- La structure des effectifs ;
- La répartition des effectifs par : services, qualification et spécialisation, ancienneté moyenne ;
- Leur formation : relevé des heures internes et externes ;
- Les conditions de travail.

Vu le nombre et la variété des tâches à accomplir, le déclenchement et le suivi des interventions nécessitent une bonne organisation du service maintenance. La MAO apporte des solutions intéressantes à ce problème.

6.2.5. La Maintenance Assistée par Ordinateur (MAO)

La MAO est un outil informatique pour une aide à la manipulation et à l'exploitation des données techniques et économiques se rapportant à l'ensemble des ressources d'un système de production. Ses objectifs sont d'ordre :

- Financier en vue d'une réduction des coûts de maintenance ;
- Technique, pour assurer la fiabilité, la disponibilité et la maintenabilité des équipements ;
- Et humains pour garantir la sécurité et les conditions de travail du personnel de maintenance.

Ses objectifs sont pris en compte principalement par deux outils : la GMAO pour l'aspect gestion et la TMAO pour tout ce qui concerne le traitement des données techniques découlant de la Maintenance prédictive.

Pour atteindre ses objectifs, la MAO à travers la GMAO dispose d'un certain nombre de variables d'actions qui sont suivies grâce à un système d'information portant sur :

- Les coûts de maintenance (cela concerne l'évaluation des temps consacrés au correctif et au préventif systématique) ;
- Les coûts de non-efficacité (ce sont les temps en dehors des heures prévues consacrées à la réparation des pannes) ;
- La qualité ;
- La fiabilité dont le principal indicateur est le MTBF ;
- Les ratios de maintenance. On en compte un certain nombre [Lyonnet 92] dont quelques-uns ont une réelle efficacité et permettent de prendre des décisions, de faire des comparaisons d'une année à l'autre, de vérifier l'intérêt de l'application d'une politique de maintenance, de prévoir un budget, etc.

Les variables d'action portent sur :

- Les moyens :
 - ♦ La gestion des coûts et du personnel,
 - ♦ les fournitures et les pièces de rechange,
 - ♦ le choix des équipements,
 - ♦ la sous-traitance,
 - ♦ la documentation,
 - ♦ la gestion des achats et des travaux.
- Les méthodes :
 - ♦ la Maintenance Corrective,
 - ♦ la Maintenance Préventive

- L'amélioration des équipements : la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité.

La MAO apporte des solutions intéressantes à la gestion et à l'organisation des différentes tâches de maintenance. Mais cette approche est encore insuffisante par rapport aux besoins actuels de certains systèmes. En effet, la MAO telle qu'elle est développée aujourd'hui [Ascometal 95], [Odysseywin 97] se réduit généralement à la GMAO. Elle ne prend en compte que la Maintenance Corrective et la Maintenance Préventive Systématique. Par ailleurs, c'est plus une base de données d'aide à la gestion "administrative" (fiches techniques, fiches de consignes, matériel et personnel, travaux, commandes, etc.) qu'un outil d'aide à la décision en temps réel. En effet, les échanges d'informations existant entre la Maintenance et les autres fonctions du système (voir Chapitre 2) ne sont pas pris en compte. De même que la Maintenance Prédicative.

Comme nous l'avons mentionné dans l'introduction, il est important avant de faire appel à un outil de GMAO ou de TMAO, de bien cerner les besoins de la Maintenance par rapport aux objectifs qu'elle doit atteindre pour répondre aux contraintes de production. En effet, cette démarche ne peut être entamée sans avoir une bonne connaissance de toutes les prérogatives de la Maintenance que ce soit en terme d'organisation ou de stratégies à mettre en œuvre.

L'état de l'art que nous présentons dans les paragraphes 8 et 9 permet d'avoir une bonne vision des préoccupations actuelles de la recherche en matière de maintenance des SFPM et par delà les approches utilisées, le besoin de développer ou de faire appel aux outils MAO.

Certains travaux s'intéressent à la structuration de la Maintenance tandis que d'autres se sont orientés vers le choix d'une politique maintenance qui soit globale et optimale.

La structuration vise par une approche de maintenance intégrée des systèmes automatisés de production à formaliser les différentes activités de la Maintenance et à prendre en compte les flux d'informations qu'elle regroupe ou partage avec les autres fonctions de l'entreprise. L'échange temps réel d'informations va garantir les prises de décision en ligne sur la base d'une concertation avec les autres fonctions de la production. Nous appellerons cette approche "approche organisationnelle" pour la différencier de l'approche "stratégique". Cette dernière est basée sur la mise en place ou l'évaluation par des méthodes analytiques d'une (ou de plusieurs) stratégies de maintenance permettant d'améliorer la SdF et de réduire les coûts de maintenance. Nos travaux portant sur cette dernière approche seront présentés dans la Seconde Partie.

Notre démarche s'est voulue double. Nous nous sommes d'une part intéressés à l'approche organisationnelle afin d'intégrer la Maintenance au Contrôle / Commande (Chapitre 2). En effet, bien qu'on retrouve en général les mêmes fonctions pour la Maintenance dans différents systèmes de production, les aspects urgence et interaction entre les différentes fonctions du

système peuvent être plus ou moins prononcés. Nous avons ainsi structuré la fonction Maintenance et défini les liens entre ses fonctions, et avec les autres fonctions du Contrôle/Commande.

D'autre part, nous nous sommes intéressés plus largement à l'approche stratégique pour laquelle nous proposons une stratégie de Maintenance Prédicative Indirecte qui fera l'objet de la Seconde Partie de ce mémoire.

7. ETAT DE L'ART SUR LES APPROCHES ORGANISATIONNELLES DE LA MAINTENANCE

7.1. Approche du LIISI (Laboratoire d'Ingénierie Intégrée des Systèmes Industriels)

L'approche du LIISI [Getan 94] a pour objectif d'établir un Modèle Conceptuel de Données (MCD) pour la Maintenance intégrée des Systèmes Automatisés de Production (SAP), plus précisément pour la partie commande.

En cours d'exploitation, il se pose le problème de la prise en compte des données mises à jour suite aux modifications inévitables sur le système. Les outils d'assistance par ordinateur ("XAO") permettent de faciliter la manipulation d'un volume de données sans cesse croissant, mais posent en même temps un nouveau problème : l'hétérogénéité des outils et des données.

La définition des échanges de données utiles à la Maintenance est faite par une approche d'intégration par les données. L'objectif est d'extraire les informations qui intéressent l'agent de maintenance.

L'intégration par les données consiste à définir un système d'information conceptuellement unique pour fournir et recueillir toutes les informations provenant de différents outils. Les informations regroupées sont ainsi non redondantes, cohérentes et mises à jour "par construction" c'est-à-dire sans traitement supplémentaire. Dans la pratique, l'intégration par les données se présente sous la forme d'un "modèle de référence" utilisant un formalisme permettant de le représenter sous la forme d'un Modèle Conceptuel de Données (MCD).

La démarche de conception du MCD est : d'identifier les données consommées et produites par les différentes sources, de les exprimer en terme de modèle de référence et enfin de produire l'interface entre la source et le système d'information.

L'aspect principal de ces travaux a été d'établir un modèle de référence pour intégrer les outils d'aide à la maintenance en facilitant leur communication. Ce outils sont :

- Les outils de conception (au sens large) du SAP ;
- Les outils de maintenance terrain (TMAO) ;
- Les outils de gestion de maintenance (GMAO) ;
- Les outils de gestion de production (GPAO) ;
- Le système automatisé lui-même.

La Figure 1.4 présente la synoptique du système intégré et les types d'échanges qui sont pris en compte.

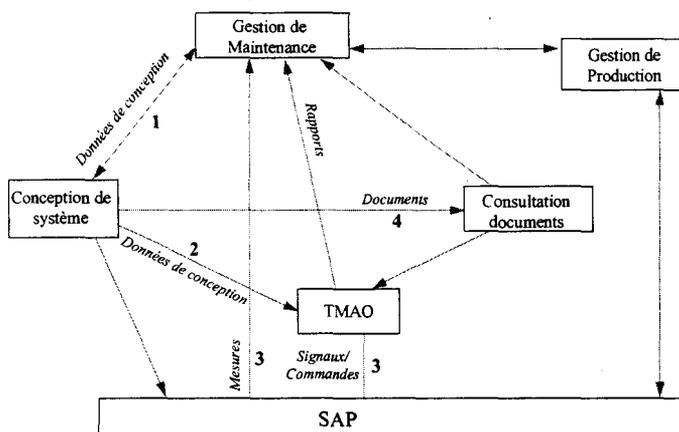


Figure 1-4 : Les principaux sous-systèmes du dispositif intégré de maintenance

Les perspectives d'échanges de données par rapport à l'architecture d'un SAP générique sont présentées à la Figure 1.5. Elles sont organisées autour de la notion d'équipement.

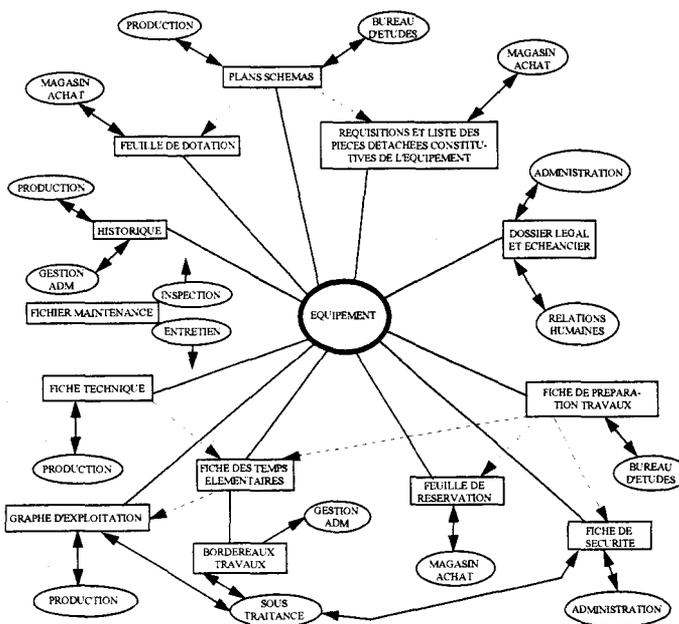


Figure 1-5 : L'équipement, noyau central des données.

L'organisation générale des équipements est représentée suivant deux principes :

- Le principe de l'arborescence unique gestion - technique. L'intérêt est d'une part de prévoir et de suivre des charges par équipement (budgets, coûts entre directions, services, secteurs, chaînes de production, etc.) et d'autre part d'effectuer un suivi technique des machines et de leurs composants pour enregistrer des faits techniques (données dynamiques) : interventions, incidents, poses et déposes, résultats de mesures, etc. ;
- La distinction constituant - matériel fonctionnel. Le concept "matériel" définit les organes réels suivis individuellement dans le système quelle que soit leur position. Le concept "fonctionnel" permet la décomposition d'une machine en plusieurs niveaux et en identifiant chacun de ces niveaux par un numéro qui n'a de signification que par rapport à l'arborescence et par sa description topographique et fonctionnelle.

L'approche du LIISI est orientée vers la modélisation des données pour la Maintenance. Il s'agit en fait d'une approche similaire à celle de la GMAO qu'elle intègre cependant, et qui est un outil d'aide à l'exploitation des données. Couplée à une approche d'intégration par les activités telle que celle que nous proposons au Chapitre 2 et qui porte notamment sur l'aspect en ligne de la Maintenance, elle représenterait une contribution non négligeable dans la conduite d'un SFPM. En effet, certains travaux de la communauté sont aujourd'hui orientés dans ce sens, par exemple ceux du LAIL-PFM pour la conception d'un référentiel [Ndiaye 98], et qui s'inscrivent dans le cadre du projet CASPAIM (Conception Assistée de Systèmes de Production Automatisés en Industrie Manufacturière) [Craye 94]. Il concerne le développement d'un ensemble de méthodes d'analyse, de conception assistée et d'implantation des SFPM. Plusieurs points de vue sont abordés conjointement (contrôle, supervision, analyse des performances, gestion de production). La diversité des formalismes employés dans chacun de ces domaines a suscité le besoin de mettre en place un référentiel assurant le partage des informations utilisées (données, traitements, ressources, événements, documents) dans l'exploitation d'un SFPM et relatives à un produit (pièce, ensemble, application informatique, processus, etc.) tout au long de son cycle de vie.

7.2. Approche du LAAS (Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes)

Cette approche [Latrèche 98] vise à mettre en place une méthodologie de développement d'un système informationnel de gestion de la maintenance dans les systèmes de production.

7.2. Approche du LAAS (Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes)

Cette approche [Latrèche 98] vise à mettre en place une méthodologie de développement d'un système informationnel de gestion de la maintenance dans les systèmes de production.

Après avoir énuméré et structuré tous les aspects, activités et méthodes ayant une relation étroite avec la Maintenance (diagnostic, analyse de performances, AMDEC, surveillance, etc.), ils sont regroupés en deux parties : ceux activés pendant le processus de production, inclus dans la partie de la "Maintenance En ligne" et ceux réalisés en dehors de la phase de production, qui appartient à la partie "Maintenance Hors ligne".

Les aspects hors ligne concernent la configuration du système en vue d'optimiser la production, l'analyse des performances, l'AMDEC, etc.

Les aspects en ligne concernent les différentes activités de maintenance telles que le diagnostic, les tests, etc.

Le premier problème à résoudre est l'organisation des données afin de trouver les liens existant entre eux. Ensuite, il s'agit de définir la Maintenance dans le cadre global du système de production, en prenant en compte les contraintes imposées par celui-ci. L'objectif est de définir les liens existant entre la Maintenance, la Commande, la Partie Opérative et les Opérateurs Humains.

L'approche proposée étudie d'abord les différentes fonctions de la Maintenance énumérées précédemment (l'analyse de performance, la surveillance qui englobe la fonction de sécurité, le diagnostic et l'AMDEC). Les informations entrant et sortant de chacune de ces fonctions sont énumérées afin d'établir les liens existant entre elles.

Maintenance Hors ligne

Durant cette phase, les stratégies de la maintenance sont définies pour chaque élément du système de production. Le cycle de développement correspondant est donné dans la Figure 1.6 suivante.

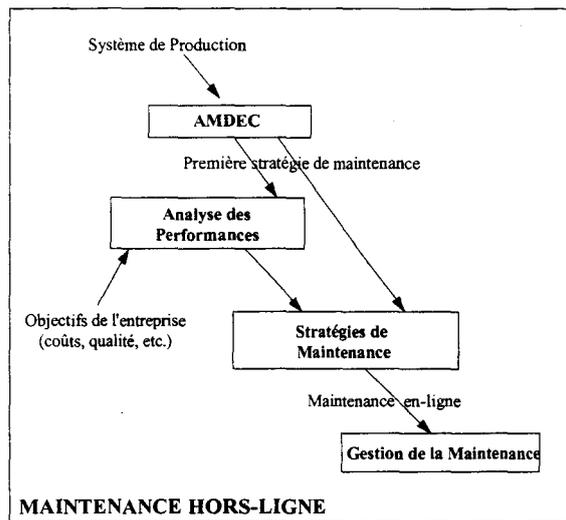


Figure 1-6 : Activités hors ligne de la Maintenance

AMDEC :

Cette étude est effectuée afin d'analyser tous les modes de défaillance correspondant à chaque élément du système de production. Elle permet aussi de déterminer les éléments critiques.

Une stratégie primaire et globale est définie lors de cette étude en déterminant un planning pour la maintenance d'une part (généralement les actions correctives proposées consistent en la maintenance préventive systématique) et pour la surveillance (placement de capteurs et d'alarmes,...) d'autre part.

L'ANALYSE ET L'EVALUATION DES PERFORMANCES :

Son rôle est de trouver une stratégie de maintenance pour les éléments critiques en fonction des objectifs de l'entreprise en terme de coût, qualité et délai avec la prise en compte des attributs de la sûreté de fonctionnement (fiabilité, disponibilité, maintenabilité et sécurité).

En résumé, cette phase permet pour :

- La maintenance, d'optimiser les stratégies de maintenance déterminées par l'étude AMDEC pour les éléments critiques ;
- La surveillance, de déterminer les seuils d'alarme .

Les stratégies obtenues seront transmises au bloc de gestion de maintenance (voir la maintenance en ligne) sous forme de fiches techniques via la banque de données des équipements. Dans ces fiches sont résumés les résultats de l'AMDEC ainsi que ceux de l'analyse de performances ; elles spécifient le numéro de l'élément, ses modes de défaillances, les causes et effets correspondant, le type de maintenance à appliquer, les pièces de rechange, outils nécessaires, etc.

La Maintenance En ligne

Les activités en ligne de la Maintenance sont : la gestion de la maintenance, la surveillance, et les opérations de maintenance effectuées par les opérateurs (Figure 1.7).

LA GESTION DE LA MAINTENANCE :

C'est la fonction la plus importante dans la maintenance en ligne, elle déclenche les activités de la maintenance après avoir :

- identifié l'élément demandant l'intervention de la maintenance ;
- consulté la fiche technique de l'élément concerné stocké dans la banque de données des équipements ;

échangé un dialogue avec le système de commande du système de production en lui signalant la demande d'intervention de la maintenance et ensuite attendre une autorisation pour le déclenchement des opérations de maintenance selon certaines règles (exemple : contraintes par rapport à la production, disponibilité des opérateurs de maintenance, des pièces de rechange, etc.).

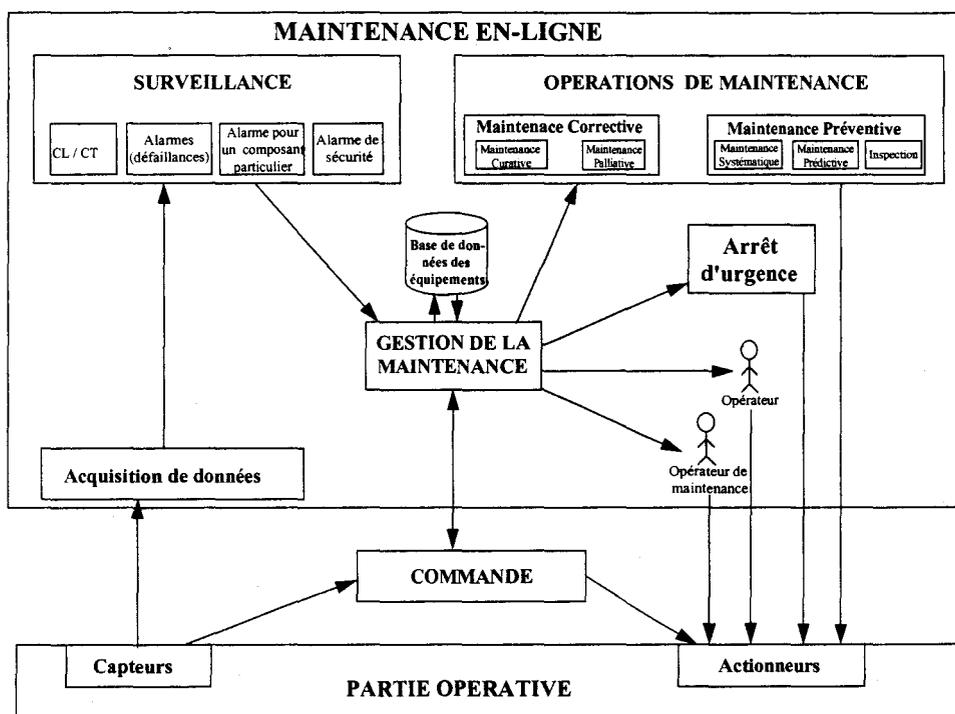


Figure 1-7 : Activités en ligne de la Maintenance

LA SURVEILLANCE :

Elle détecte les défaillances et les états dégradés et les signale sous forme d'alarmes classées selon des critères d'urgence ou de sécurité pour la maintenance préventive.

LES OPERATIONS DE MAINTENANCE :

C'est la fonction chargée d'exécuter les différentes opérations de maintenance. Elle comporte des activités de Maintenance Corrective et de Maintenance Préventive, etc.

L'approche du LAAS est en parfait accord avec notre démarche de structuration de la Maintenance des SFPM. Elle identifie bien l'ensemble des activités de la Maintenance en dissociant les activités qui sont effectuées hors ligne de celles qui sont effectuées en ligne. Cela permet une meilleure organisation des données, mais peut-être pas leur meilleure exploitation. En effet, les résultats de la surveillance en ligne du système peuvent aboutir à des procédures d'évaluation des performances en ligne en vue de déterminer l'impact réel d'une baisse de performance d'une ressource dégradée sur le système. L'analyse de flux que nous présentons dans la seconde partie de ce mémoire en est un exemple. Elle aboutit à une évaluation de performance en ligne suite à une dérive de flux en vue de déterminer son impact sur le système. Cela permet de décider d'une intervention en concertation avec la production.

Par ailleurs, l'approche du LAAS n'aborde pas assez l'aspect échange d'informations entre la Maintenance et les autres fonctions du Contrôle/Commande. Seule la communication entre la Gestion de la Maintenance et la Commande est abordée pour ce qui concerne les contraintes de production qui pourraient retarder l'activité de maintenance. En réalité, il est souvent difficile de fédérer les objectifs de la Production et ceux de la Maintenance. Sans d'autres critères de concertation entre les deux, les objectifs de production risquent de toujours passer avant ceux de la Maintenance, au moins pour les tâches jugées "non urgentes" par la Production et pouvant pourtant, à long terme, engendrer des coûts importants de maintenance ou avoir par exemple un effet négatif sur la qualité ou les quantités produites.

C'est en étant conscients de cette dualité Maintenance/Production que nous avons orienté la seconde partie de nos travaux sur la fédération des objectifs de production et de maintenance à travers une approche de Surveillance Prédictive Indirecte. Celle-ci vient en complément des autres approches de surveillance existant, mais a l'avantage de proposer un outil d'interprétation commun de l'état des ressources par la Production et la Maintenance. Ainsi, les différentes fonctions de la Maintenance répertoriées par [Latrèche 98] (AMDEC, Analyse des performances, Stratégies de Maintenance, Surveillance) pourront être menées dans le cadre de la Surveillance Prédictive Indirecte et permettre de mieux décider de l'opportunité d'une intervention.

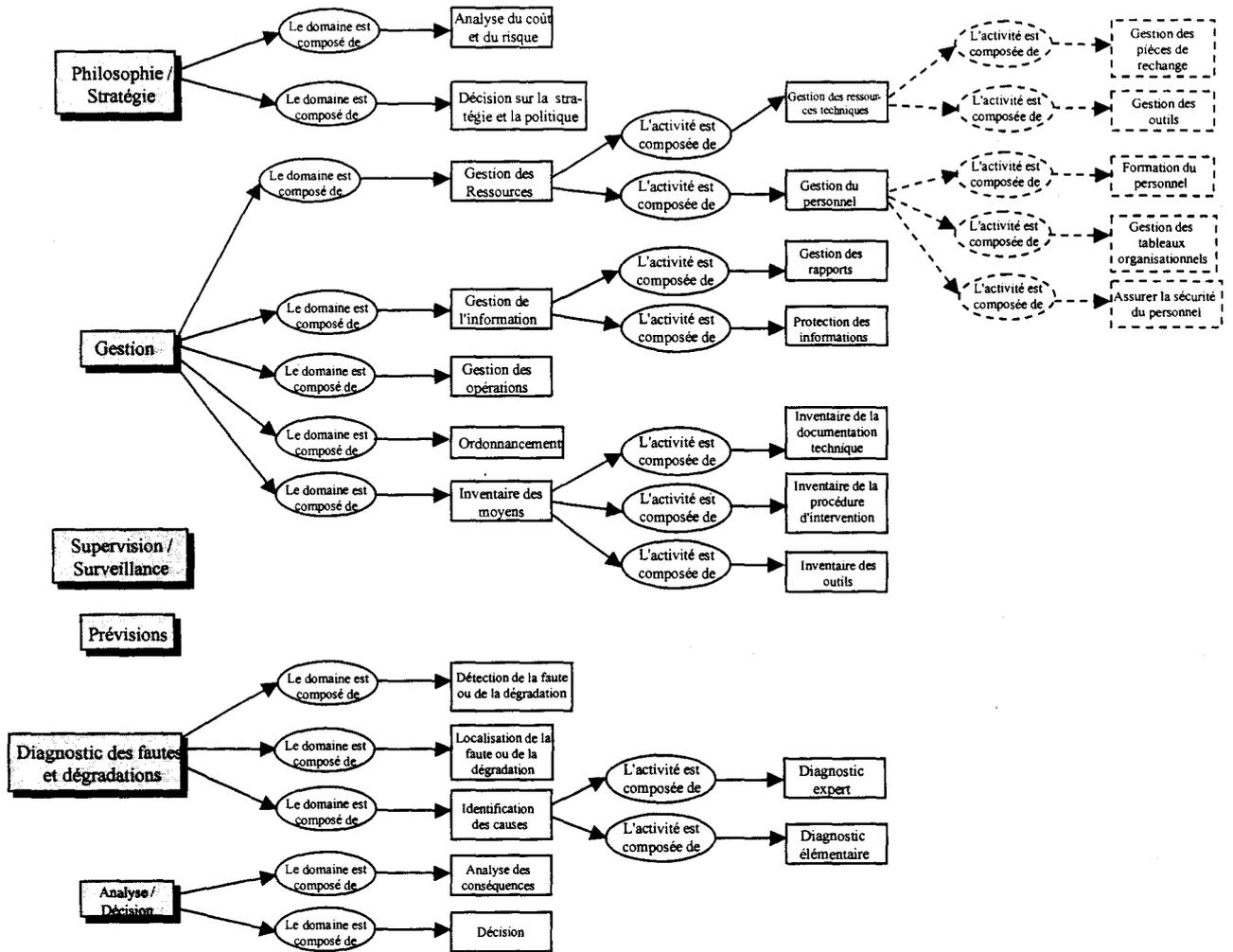
7.3. L'approche du CRAN (Centre de Recherche en Automatique de Nancy)

Les travaux du CRAN-GSIP [Leger 98a], [Leger 98b] portent sur la mise en œuvre d'une approche méthodologique de conception d'un système de maintenance distribuée. L'objectif est d'optimiser la Maintenance par son intégration avec l'ensemble des fonctions de production. La Maintenance prévisionnelle est étudiée plus particulièrement, dans le but de traiter de la disponibilité du système de production et implicitement de sa sûreté de fonctionnement. La méthode d'analyse utilisée est basée sur la dualité fonctionnement - dysfonctionnement pour déduire des relations de cause à effet entre les défaillances du système et les flux entrants ou sortants du système et entre les défaillances elles-mêmes.

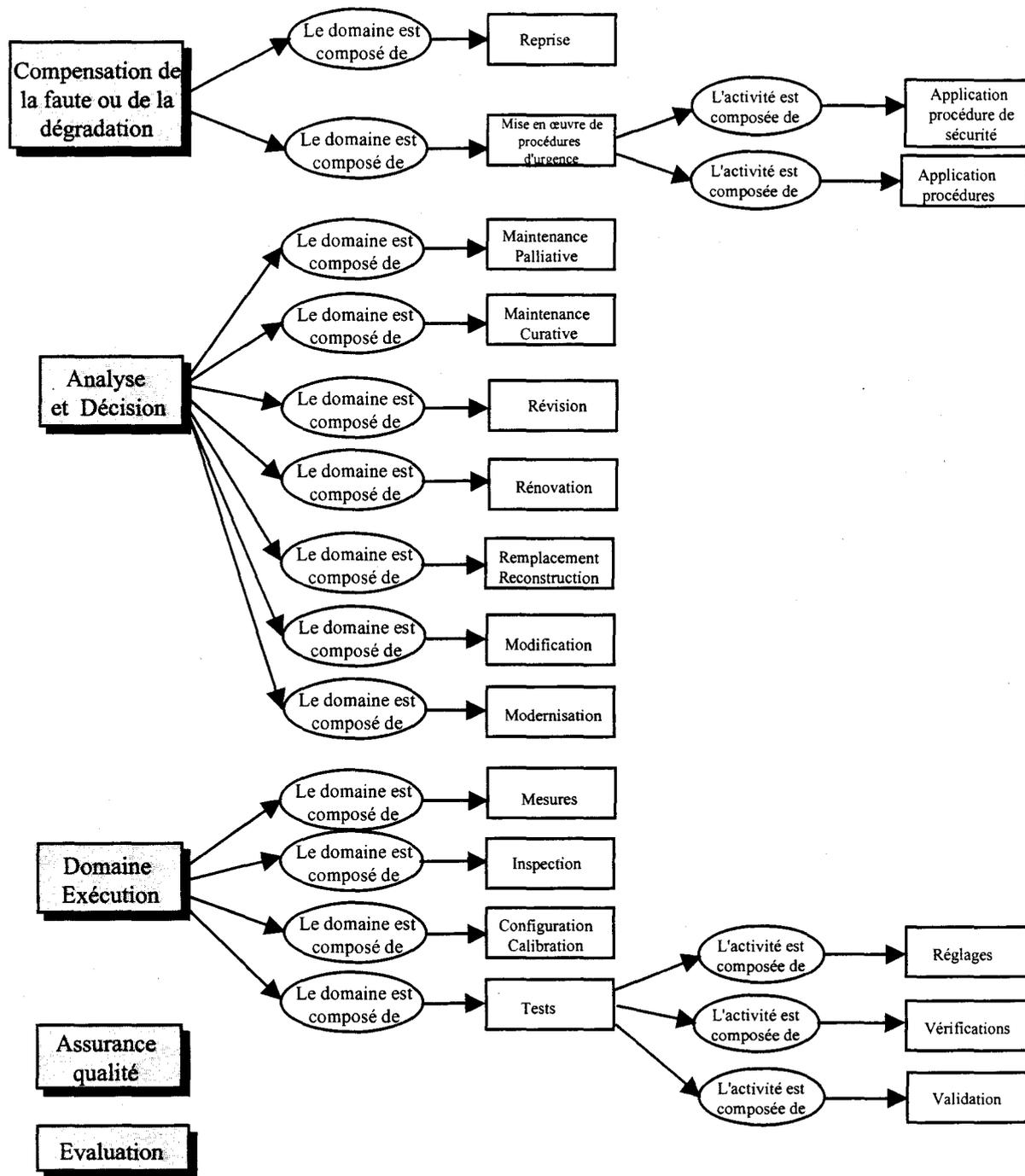
La Maintenance est identifiée comme faisant partie intégrante du système de production. Par conséquent, son intégration avec les autres fonctions du système doit se faire tant sur le plan fonctionnel, qu'informationnel. Dans l'architecture du système de production, les activités sont vues comme un système dynamique, une synergie de plusieurs domaines de compétence générant et recevant différents événements, et partageant les objectifs de l'entreprise.

Les secteurs de compétence (d'intervention) de la Maintenance portent sur plusieurs domaines du processus et correspondent à différents objectifs (Figures 1.8a et 1.8b).

CONTRIBUTION PAR LA SURVEILLANCE PREDICTIVE INDIRECTE A L'OPTIMISATION DE LA MAINTENANCE DANS LES SFPM



(a)



(b)

Figure 1-8 : Les différentes activités de la Maintenance

L'intégration de la Maintenance sur le plan informationnel est effectuée par la définition d'un référentiel intégrant tous les flux d'informations circulant au sein de la Maintenance, et prenant en compte l'aspect prédictif.

La Maintenance prédictive est essentiellement basée sur l'étude des variations de l'état du système par une analyse des informations ou des données pertinentes qui matérialisent sa dégradation ou sa dérive. La dynamique d'une dégradation permet de décrire les valeurs

passées, présentes et futures comme une variable de contrôle permettant de représenter l'évolution de la dégradation dans le temps. Cette représentation est nécessaire pour mettre en œuvre l'approche fonctionnelle des objectifs de la Maintenance prédictive.

La Maintenance prédictive contrôle les dégradations en intervenant sur l'élément dégradé qui doit remplir tout ou une partie de sa fonction. Cette action doit permettre la reprise ou la mise en œuvre d'une procédure d'urgence, la reconfiguration, l'utilisation d'une autre fonction équivalente à celle défaillante, etc. La correction d'une dégradation doit se faire en ne mettant en œuvre que les actions qui sont en cohérence avec le comportement du système afin d'assurer le passage d'un état dégradé à un état normal dans les meilleures conditions de sécurité.

Pour supporter les exigences de la Maintenance prédictive, le système doit prendre en compte toutes les fonctionnalités définies précédemment, relatives à l'aspect dynamique de la dégradation à travers les trois fonctions : la Surveillance, le Diagnostic et le Pronostic.

Ces trois fonctions permettent d'élaborer l'information nécessaire pour la prise de décision sur les actions à mettre en œuvre. L'application de la décision se fait par les fonctions de Compensation, Correction et Exécution, qui transmettent à l'agent de maintenance l'ensemble des tâches à exécuter.

L'ensemble de ces fonctions représente le Système de Maintenance Prédictive (Figure 1.9) qui est le sous-système dynamique du Système de Maintenance.

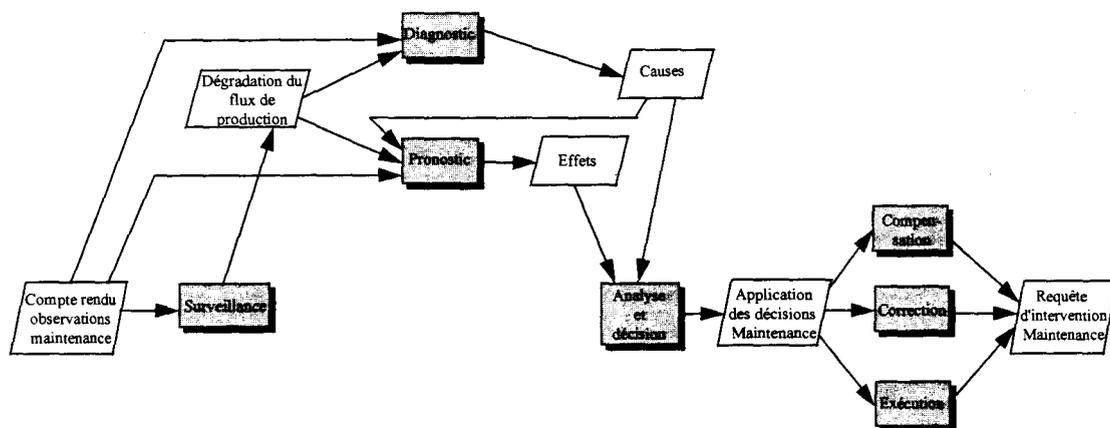


Figure 1-9 : Modélisation des activités du Système de Maintenance Prédictive

En vue d'intégrer le Système de Maintenance Prédictive avec le système de Supervision et de commande du système de production, les échanges d'informations entre les deux sont répertoriés ainsi :

- Les quatre activités d'observation de la Maintenance Prédictive (gestion de la Maintenance, surveillance, diagnostic et pronostic) mettent à la disposition du Système de Supervision et de Commande les informations relatives aux défaillances et à leur évolution future.

- Les trois activités opérationnelles de la Maintenance Prédictive (compensation, correction et exécution) mettent à la disposition du Système de Supervision et de Commande les valeurs données concernant les procédures de compensation et de correction qui ont été choisies.
- L'activité de décision de la Maintenance Prédictive informe le Système de Supervision et de Commande de la disponibilité du système.

Toutes ces informations vont alimenter (Figure 1.10) le module "Validation des objectifs" du Système de Supervision et de Commande qui est divisé en quatre modules dont les fonctions sont :

- L'"Observation" chargée de surveiller la commande et de détecter les défaillances capteurs,
- La "Validation des objectifs" qui est chargée de valider la commande et les requêtes de la Maintenance, et de gérer les conflits avec ces requêtes,
- L'"Information" qui fournit à la Maintenance Prédictive les informations provenant des autres fonctions du système.

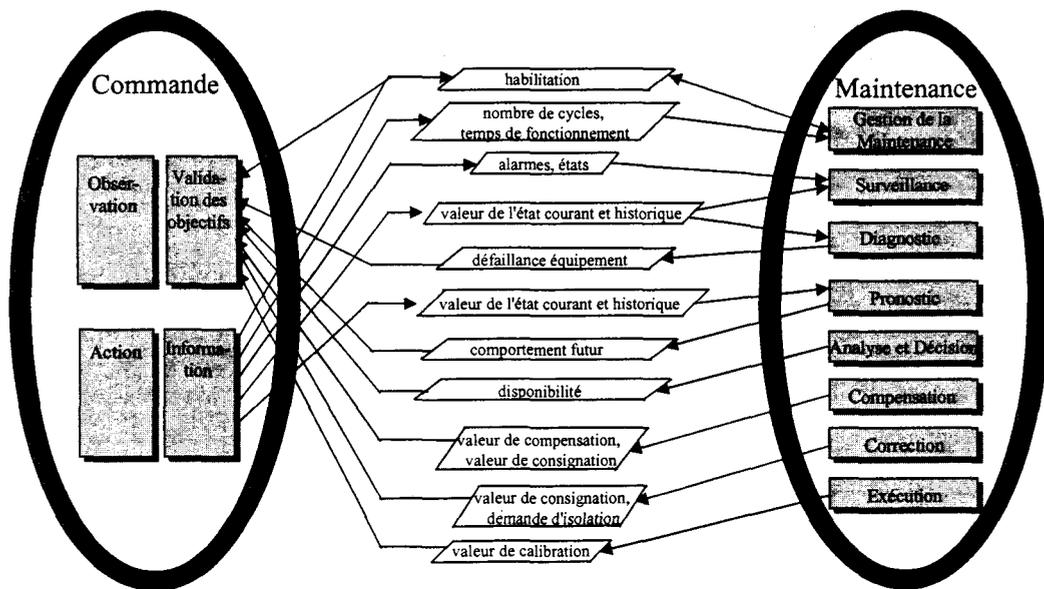


Figure 1-10 : Informations échangées entre la Maintenance Prédictive et le Système de Supervision et de Commande

Comme les travaux du LAAS, les travaux du CRAN visent par une approche fonctionnelle et informationnelle l'intégration de la Maintenance avec les autres fonctions du SAP. Les activités de la Maintenance sont identifiées, et une attention particulière est donnée à la Maintenance Prédictive pour la prise en compte des défaillances progressives.

Dans le contexte de l'automatisation des SFPM, la Maintenance est devenue bien plus qu'un outil auxiliaire d'"entretien". Elle participe à la conduite et à l'optimisation du fonctionnement du système par les solutions qu'elle apporte pour améliorer la disponibilité, la fiabilité et la sécurité du système. Par conséquent, une réflexion sur la nature de ses activités, leurs caractéristiques leurs interactions, y compris entre Maintenance et Commande est en train d'être menée à travers différents travaux. Différents laboratoires travaillent simultanément sur les mêmes concepts Données/Activités et parfois plus spécifiquement sur la Maintenance Prédictive. Nos travaux vont dans le même sens et partagent certains centres d'intérêts avec ceux-ci, notamment pour ce qui concerne la structuration de la Maintenance et la Maintenance Prédictive.

8. ETAT DE L'ART SUR LES APPROCHES STRATEGIQUES

8.1. Approche du LAG (Laboratoire d'Automatique de Grenoble)

Les travaux menés au LAG dans le cadre de la Maintenance [Sassine 98] s'intéressent d'une part à l'intégration de la fonction Maintenance dans un système de production manufacturière pour améliorer sa sûreté de fonctionnement et ses performances ; et d'autre part à l'analyse de son impact dans le but de choisir la politique de Maintenance la mieux adaptée à implanter. L'intégration de la fonction maintenance est effectuée au niveau de chacune des machines du système de production.

Pour un type de défaillance donné, la stratégie de maintenance choisie peut être plus ou moins efficace qu'une autre stratégie de maintenance qui aurait pu être mise en œuvre. Par ailleurs, les objectifs fixés par la Direction de la production ne sont pas stables en permanence et peuvent varier à tout moment : minimiser le coût de la production, minimiser la durée de la maintenance, etc. A cela vient s'ajouter le fait que les intervenants peuvent avoir des points de vue différents sur la priorité entre les divers critères (Coût, Disponibilité, Fiabilité, Maintenabilité et Productivité) à considérer. Des décisions doivent donc être prises dès la phase de conception, avant la mise en service et doivent se poursuivre en temps réel durant toute la durée de fonctionnement de l'atelier, afin de sélectionner à tout instant la "bonne" procédure de maintenance à exécuter.

Un tableau de bord d'indicateurs de performances et de sûreté de fonctionnement a été défini. Ces indicateurs sont classés selon des critères de Productivité, de Coût, de Fiabilité, de Disponibilité, et de Maintenabilité. L'objectif est de pouvoir choisir, selon ces critères et parmi une liste de stratégies de maintenance proposées, la "meilleure" stratégie à implanter en "temps réel", c'est-à-dire en tenant compte des perturbations de l'environnement, des ressources disponibles à l'instant considéré, et du retour d'expérience. Mais effectuer ce choix implique la sélection d'un scénario parmi un ensemble de possibilités, c'est-à-dire prendre une

décision. Pour ce faire, l'approche fait appel à l'analyse multicritères d'aide à la décision à travers un Système Interactif d'Aide à la Décision (SIAD). Le terme interactif signifie que la prise de décision se fait au moyen d'une interaction entre un algorithme de décision et l'opérateur.

L'outil développé, appelé SIMADM (Système Interactif Multicritère d'Aide à la Décision de Maintenance) est dédié aux systèmes de production manufacturières. Il répond aux questions : pour une machine donnée, quelle stratégie de maintenance implanter ? Préventive, corrective ou mixte ? A quelle périodicité intervenir ? Comment accroître les performances ? Quelles actions permettent d'améliorer le niveau de sûreté de fonctionnement ? etc.

La structure de décision est définie en considérant tous les éléments du problème du plus général au plus spécifique, et en les organisant en niveaux suivant les trois principales directives ci-dessous :

1. Identification des objectifs généraux. L'objectif principal est ici l'amélioration des Performances et de la Sûreté de fonctionnement (PSdF).
2. Identification des critères qui satisfont chaque objectif. Les critères représentent ici : le Coût (C), la Disponibilité (D), la Fiabilité (F), la Maintenabilité (R) et la Productivité (P).
3. Identification des sous-critères de chaque critère.

Certains des sous-critères choisis sont :

- Pour le Coût : le Coût d'Arrêt pour cause de Défaillance (CAD), le Coût d'Arrêt pour maintenance Corrective (CMC), le Coût Total de la Production (CTP), etc.
- Pour la Disponibilité : la Disponibilité OPérationnelle (DOP), l'Indisponibilité due aux arrêts pour Maintenance Préventive (IMP), etc.
- Pour la Fiabilité : la Fréquence OPérationnelle d'Arrêt (FOA), la Fréquence des Arrêts pour cause de défaillance (FAD), la Fréquence des Arrêts Propres (FAP), etc.
- Pour la Maintenabilité : le TauX du Correctif (TXC), l'Efficacité Technique de la Maintenance (ETM), etc.
- Pour la Productivité : la PProductivité Propre (PRP) et la PProductivité OPérationnelle (PRO).

La hiérarchie définie est représentée à la Figure 1.11.

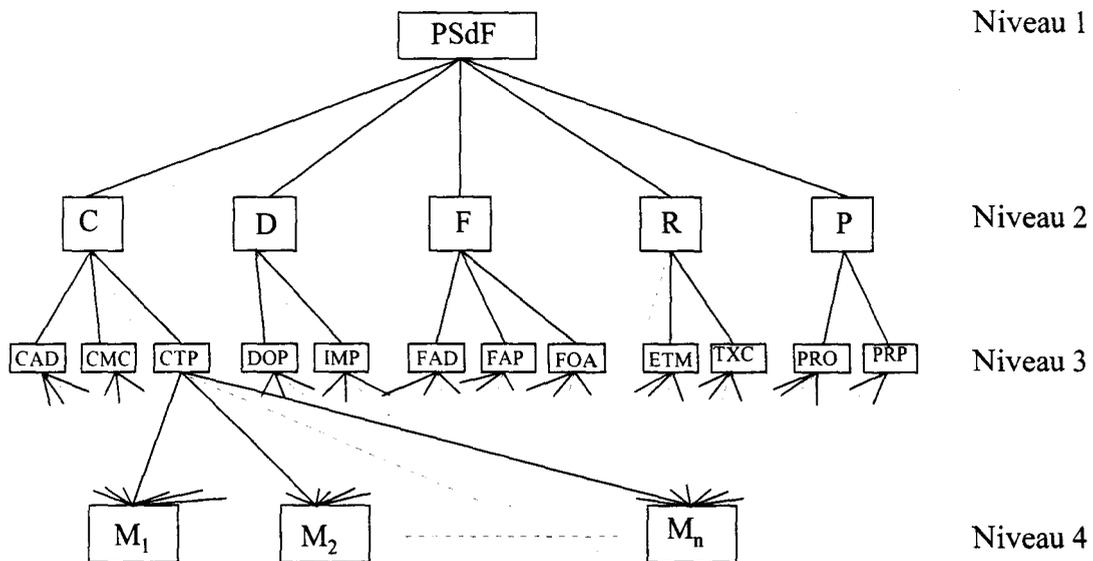


Figure 1-11 : Principale hiérarchie du processus de décision de maintenance.

Pour évaluer une comparaison entre les éléments d'un même niveau hiérarchique, une échelle de valeurs est définie et permet de comparer par paires les éléments à l'aide d'une matrice carrée et de classer par ordre d'importance par rapport à chaque critère défini. A certains niveaux tel que le niveau 2, le jugement sur l'importance d'un critère par rapport à un autre est donné par l'opérateur, alors que pour des niveaux plus bas (par exemple le niveau 4), la comparaison des éléments s'effectue à partir de valeurs calculées.

La comparaison par paires une fois effectuée, la prochaine étape est la recherche d'un vecteur de priorité qui classe les machines M_i par ordre croissant (décroissant) suivant les critères définis précédemment.

Pour classer les machines (niveau 4) par ordre de priorité contribuant à l'achèvement de l'objectif principal PSdF on agrège les poids relatifs des différents niveaux de la hiérarchie permettant ainsi de fournir un classement des alternatives de décision. Le principe consiste à effectuer un produit de matrices de deux niveaux adjacents.

Cela donne un vecteur qui classe les machines par ordre de priorité participant à l'accomplissement de l'objectif "Coût" (C). La même procédure est appliquée pour tous les indicateurs (niveau 3) et tous les critères (niveau 2). Le résultat final obtenu sera un vecteur qui donnera l'ordre (croissant ou décroissant) du niveau PSdF de toutes les machines de l'atelier.

L'algorithme de décision PHADEM (Processus Hiérarchique Analytique pour la Décision Maintenance) décrit à la Figure 1.12 permet de déterminer la meilleure stratégie de maintenance à appliquer à chaque machine de l'atelier.

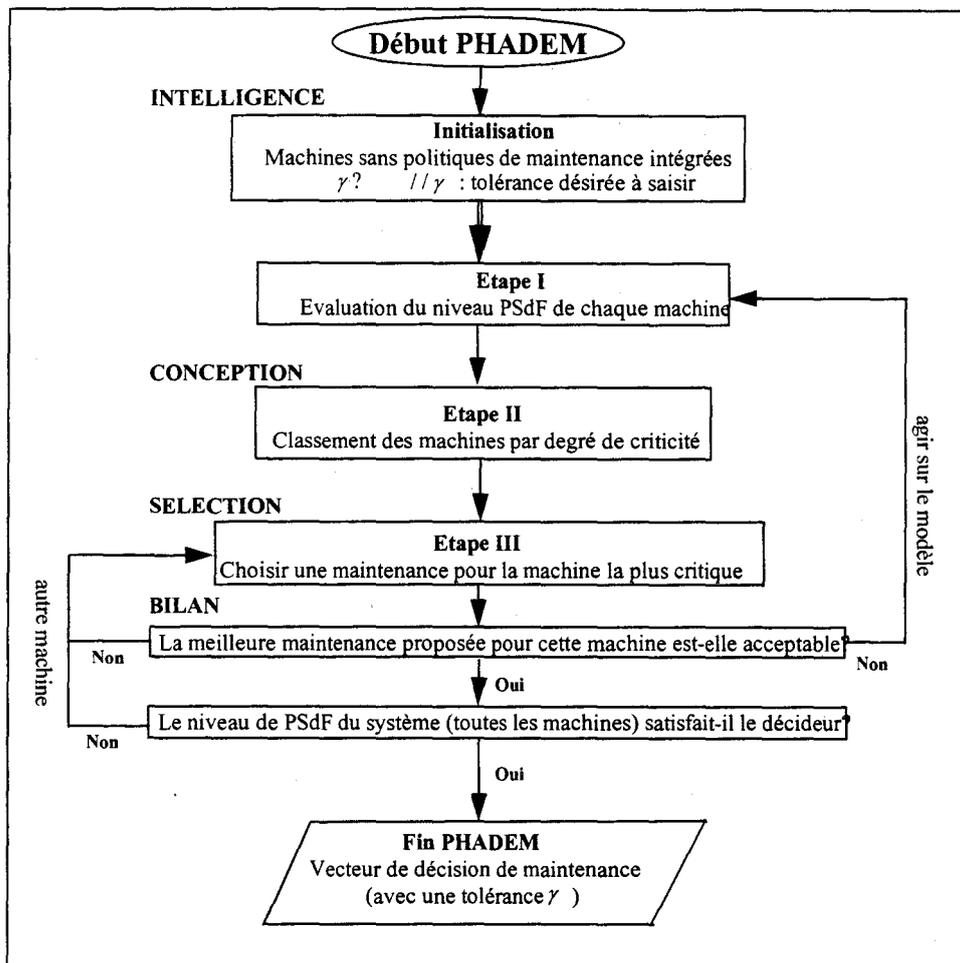


Figure 1-12 : L'algorithme PHADEM pour la décision de maintenance

8.2. Approche du LAMIH (Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielle et Humaine)

L'approche du LAMIH [Bergot 94], [Bergot 95] propose une méthodologie ADEMIS (Aide à la Définition et à la Mise en œuvre des Stratégies de maintenance) qui vise à apporter à l'ingénieur de maintenance, une démarche exhaustive, formelle et structurée pour la définition et la mise en œuvre des stratégies de maintenance des éléments critiques d'un système de production. Les Stratégies de maintenance portent sur l'ensemble des décisions et des actions relatives au choix des techniques, méthodes et outils qui permettront de maintenir ou de rétablir l'aptitude d'un système à satisfaire une ou plusieurs fonctions requises, dans les conditions données sur un intervalle de temps donné. Les éléments critiques représentent les éléments du système susceptibles, par leur défaillance, d'entraver la production (en terme de productivité, de qualité, de délai, etc.) et/ou de mettre en cause la sécurité (humaine, matérielle et environnementale). L'analyse des éléments critiques du système de production a pour objectif d'affecter un ordre de priorité à ces éléments dans le but d'appliquer la démarche ADEMIS à l'élément le plus prioritaire. Pour cet élément (et les autres par la suite),

l'ingénieur de maintenance cherchera alors à définir la stratégie de maintenance la plus adaptée.

La démarche ADEMIS s'appuie sur un processus d'analyse et de décision en trois phases (Figure 1.13).

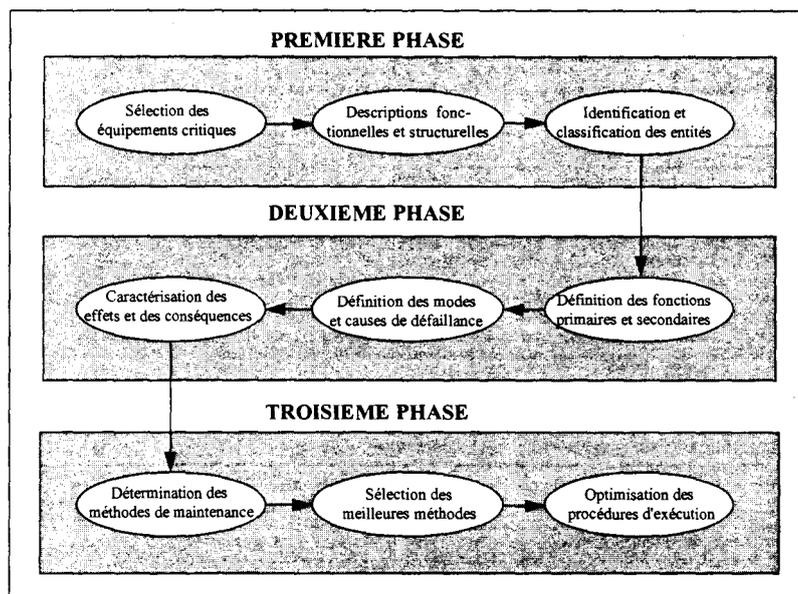


Figure 1-13 : Méthodologie de choix d'une stratégie de maintenance.

Dans la première phase, le *niveau de criticité* de tous les éléments constituant l'outil de production est défini. Ce niveau de criticité s'appuie sur la *notion de risque*, laquelle peut être considérée comme une entité à deux dimensions (fréquence d'apparition des défaillances et gravité des conséquences) caractérisant aussi bien des événements mettant en cause la production (forte probabilité d'occurrence, faible conséquence). Les équipements critiques sont ensuite décomposés selon une double description, structurelle et fonctionnelle, permettant d'identifier et de classer (en fonction de leur aptitude à la réparation et au remplacement) toutes les entités qui seront soumises à des actions de maintenance.

Dans la deuxième phase, les fonctions primaires et secondaires de chaque entité sont définies, et pour chacune de ces fonctions, les modes de défaillance possibles sont identifiés, c'est-à-dire la manière dont l'entité viendrait de façon totale ou partielle, à ne plus remplir sa fonction. Pour chaque mode de défaillance, les causes et les effets sont recherchés, ces derniers caractérisant les conséquences de la défaillance. Ces conséquences seront classées dans l'une des quatre catégories suivantes : *conséquences cachées* (aucun impact direct mais menant ultérieurement à d'autres défaillances plus sérieuses), *conséquences non-opérationnelles* (induisant seulement le coût de l'intervention), *conséquences opérationnelles* (affectant la production en plus du coût de maintenance) et *conséquences sur la sécurité et l'environnement*.

Dans la troisième phase, les méthodes de maintenance applicables pour chaque entité sont sélectionnées, sur la base des éléments précédents et d'un certain nombre de critères techniques (évolution du taux de défaillance, détectabilité de la défaillance, processus de dégradation, etc.). Le choix définitif des méthodes s'effectue ensuite en fonction de critères économiques notamment pour les décisions concernant un choix entre maintenance corrective et maintenance préventive ou entre remplacement et réparation. Enfin, les procédures d'exécution de chaque méthode retenue sont optimisées, en définissant par exemple, la périodicité optimale pour une maintenance préventive ou un échange standard d'élément.

Les approches du LAG et du LAMIH visent par une analyse en ligne pour la première et hors ligne pour la seconde à définir la meilleure politique de maintenance à appliquer aux ressources du système. Cette analyse s'intéresse à l'ensemble des ressources d'un système de production dans le cas de l'approche du LAG, et se limite aux éléments critiques du système dans le cas de l'approche du LAMIH. Elles font appel à différents critères fonctionnels, opérationnels, de coûts et de sûreté de fonctionnement, et se basent dans les deux cas, principalement sur les stratégies de maintenance classiques que sont la maintenance corrective (palliative et curative) et la maintenance préventive (systématique et prédictive directe).

La politique de maintenance que nous proposons diffère de ces deux approches par sa stratégie de maintenance prédictive indirecte qui est en elle même une méthode d'évaluation des performances des ressources à travers les services qu'elles délivrent. Bien entendu, cette méthode ne prétend pas donner une approche complète sur les critères de performances à considérer dans le choix de la stratégie de maintenance à appliquer à une ressource car elle ne considère que le point de vue des performances de la ressource en terme de produits fabriqués. Nous verrons à la fin de ce mémoire (Chapitre 4) que l'exploitation des résultats de l'approche de Surveillance Prédictive Indirect, dans le cadre d'une politique de maintenance intégrant les aspects sûreté de fonctionnement tels que proposé dans l'approche du LAG permet une plus grande maîtrise des critères de performances des ressources.

9. CONCLUSION

L'intégration de la Maintenance nécessite la prise en compte de la complexité des systèmes de production qui rend leur exploitation à la fois plus performante et plus fragile.

L'exploitation est plus performante, parce que la fiabilité des matériels a progressé considérablement et que la mise en œuvre de stratégies de maintenance appropriées à chaque matériel permet d'obtenir des rendements de plus en plus élevés. Mais l'exploitation est aussi fragile, parce que le moindre aléa indésirable peut remettre en cause la production ou mettre en péril le système. Et ce n'est pas le personnel de plus en plus rare dans les usines qui peut compenser instantanément les défaillances.

Dans le contexte d'exploitation où nous nous plaçons, il est impératif de mener une politique de Maintenance qui tienne compte non seulement des données de fiabilité mais également de la particularité des SFPM. En effet, le mode d'exploitation de ce genre de système selon les flexibilités dont il dispose, et l'existence de moyens de surveillance et de compensation des défaillances peut influencer considérablement sur le choix des stratégies de maintenance. A cela viennent s'ajouter les coûts liés aux opérations de maintenance qu'il faut analyser face aux coûts de production.

C'est dans ce contexte que l'optimisation de la Maintenance doit être menée. Elle doit correspondre à la recherche d'un compromis entre les coûts de maintenance, la disponibilité résultante, le niveau de sûreté de fonctionnement et la productivité recherchée.

Cette optimisation doit d'abord se traduire par une meilleure structuration de la Maintenance. Dans la réalité, cette structuration se traduira d'une part par la définition de l'ensemble des fonctions de la Maintenance, et d'autre part par la prise en compte de toutes les informations lui permettant de répondre à chaque instant aux exigences de l'objectif premier de production. Ces décisions se concrétisent par des actions sur la consistance et la fréquence des tâches de maintenance. Certaines tâches seront supprimées parce qu'inadaptées, d'autres modifiées dans leur contenu, d'autres encore appliquées à des composants et des sous-ensembles qui n'en faisaient pas l'objet. Dans le même temps, les fréquences d'application seront modifiées en fonction des informations rassemblées sur l'évolution de l'état du procédé.

Pour aborder ce problème complexe, notre démarche sera la suivante : forts des connaissances que nous possédons sur les différentes activités de la Maintenance (paragraphe 6), nous essaierons de voir comment les mettre en œuvre dans le cadre des SFPM dans les deux étapes d'optimisation que nous avons identifiées : la structuration de la Maintenance (Chapitre 2) et le développement de la Surveillance Prédictive Indirecte (Chapitre 3). La structuration de la Maintenance se fera par l'intégration de ses fonctions au Contrôle/Commande.

Chapitre 2 : Maintenance et Contrôle / Commande des SFPM

1. INTRODUCTION

S'il n'est pas nécessaire de rappeler l'importance prise par la Maintenance dans le contexte actuel d'organisation et de gestion des entreprises, il faut convenir que ce centre reconnu de rentabilité n'est pas encore exploité à sa juste mesure.

Cette pleine exploitation de la Maintenance est rendue difficile car elle entraîne :

- Un bouleversement des schémas "classiques" d'organisation et des relations d'ordre avec les autres services dans l'entreprise ;
- Une évolution des cadres de décision par l'extension des champs couverts et des apports de la Maintenance.

Dans le cadre des SFPM, l'évolution de la production vers le juste à temps exige une politique de Maintenance plus adaptée, dont les principaux objectifs se résument en trois activités : participer à l'élimination des excès (en garantissant la fabrication des quantités justes suffisantes pour satisfaire la demande), des rebuts (en garantissant la qualité) et des variations (en garantissant la disponibilité des équipements).

Bien que d'une part des méthodes de surveillance [Brunet 90] très performantes soient utilisées pour suivre le comportement des ressources et la qualité des produits fabriqués et que d'autre part une politique de maintenance (Maintenances Corrective et Préventive) soit mise en place, il se pose un problème de communication et de "compréhension" entre la Maintenance et la Production. En effet, suite à une défaillance détectée par la Surveillance, la Maintenance doit intervenir plus ou moins rapidement selon la gravité de la défaillance pour remettre l'élément en état de bon fonctionnement. Pour ce faire, un certain nombre d'informations doivent s'échanger entre la Maintenance et la Production afin de permettre à la première de prendre les "bonnes décisions, au bon moment", et à la seconde de mieux gérer ses objectifs de production.

Il peut se poser un problème d'interprétation de ces événements entre la Maintenance et la Production. En effet, elles peuvent avoir à priori des objectifs contradictoires. Une tâche peut être urgente pour la Production et ne pas l'être pour la Maintenance, et vice versa. La Production raisonne en terme de délais et de productivité, tandis que la Maintenance raisonne principalement en terme de coût et d'efficacité (regroupement des tâches, organisation du personnel, etc.).

C'est pour prendre en compte cette dualité que nous menons l'Intégration de la Maintenance avec les autres fonctions du Contrôle/Commande [Ly 96], [Ly 97]. Cette intégration représente la première phase de la définition d'une politique de maintenance adaptée aux SFPM. L'aspect communication en temps réel entre la Maintenance et les autres fonctions du Contrôle / Commande est pris en compte, l'objectif étant d'améliorer la coordination des activités des différentes fonctions.

Dans ce chapitre, nous définissons d'abord le contexte des SFPM à travers les notions de flexibilités (paragraphe 2). Nous décrivons ensuite l'organisation du Contrôle/Commande (paragraphe 3) d'un SFPM et proposons une nouvelle structuration de la Maintenance (paragraphe 4) permettant de prendre en compte ses liens avec les autres fonctions du Contrôle/Commande (paragraphe 5).

2. DEFINITION PRELIMINAIRES : NOTIONS DE FLEXIBILITES

Comme nous l'avons déjà souligné, la mise en place d'une politique de maintenance pour les SFPM dépend largement des caractéristiques et du mode d'exploitation de ceux-ci. C'est pour cela que nous définissons dans ce paragraphe les notions de flexibilités qui permettent de caractériser les SFPM.

La flexibilité est synonyme de degré de liberté offert par l'architecture de production au Contrôle/Commande. Aussi, il convient de préciser les types de flexibilité que l'on peut rencontrer dans un système flexible de production. En effet, certains choix stratégiques initiés par la Maintenance (et d'autres fonctions du Contrôle/Commande que nous verrons au paragraphe 3) dépendent en partie des flexibilités de ce dernier.

Nous distinguons généralement trois types de flexibilités [Berruet 96]

1. Les Ressources polyvalentes :

Ce type de flexibilité est accessible dans le cas de machines dites polyvalentes pouvant effectuer des opérations distinctes selon le type de programmes de commande qui leur est alloué. Par exemple un centre d'usinage pourra réaliser diverses opérations de perçage sur certaines pièces et de fraisage sur d'autres pièces.

2. La Flexibilité dans l'architecture de production :

Celle-ci peut se situer au niveau :

- Des ressources de production. C'est l'exemple de deux machines pouvant réaliser la même opération. Nous avons plus qu'une simple redondance sélective comme c'est le cas dans les systèmes continus. Nous pouvons en effet soit orienter le flux des pièces à usiner sur une seule machine (l'autre intervenant en cas de défaillance de la première), c'est la redondance passive, soit partager ce flux sans forcément charger au maximum les machines, c'est la redondance active.
- Du système de transport (convoyeur, robot de chargement/déchargement, chariot filoguidé etc.). C'est le cas lorsque l'on a deux robots de chargement d'une même machine ou lorsque le convoyeur permet d'atteindre un emplacement par plusieurs chemins.

3. La Flexibilité de production (ou Flexibilité opératoire) :

Elle est relative à la manière dont sont coordonnées les opérations subies par les produits. On distingue :

Le **Flow shop** : c'est l'exemple d'une ligne de production de véhicules automobiles. Les postes de travail sont placés en série (par exemple, la carrosserie passe par un poste de soudage puis on lui pose un pare-brise). Les produits peuvent être fabriqués en quantité variable, mais subissent le même ordre de passage fixe sur les machines. Il n'y a aucune flexibilité dans les opérations et les produits. On fabrique un seul type de produit avec quelques variantes (on peut par exemple poser un pare-brise teinté). Dans ce type de système, la défaillance d'un équipement (par exemple de la catégorie A - Chapitre 1, paragraphe 5 -) nécessite une intervention urgente de maintenance.

Le **Job shop** : il offre la possibilité de fabriquer des produits différents en quantité variable. Par exemple, on choisit de produire m_1 pièces de type 1 et m_n pièces de type n. Le job shop n'admet pas de flexibilité dans la séquence des opérations. En utilisant le formalisme des Réseaux de Petri, nous admettons les deux gammes suivantes sur notre SFPM.

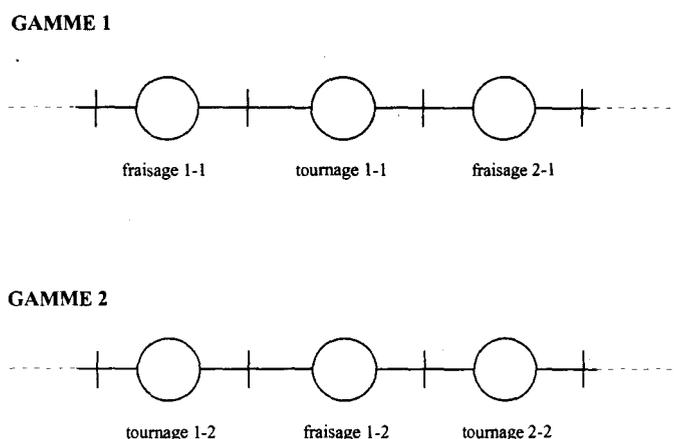


Figure 2-1 : Le Job shop

Le Job shop se base sur la polyvalence des ressources ainsi que la flexibilité de l'architecture de production.

Dans un système de production de type Job shop, la défaillance d'un équipement de la catégorie B (Chapitre 1, paragraphe 5), provoquerait un ralentissement de la production ou une baisse de la qualité d'un type de pièces donné. Une bonne coordination entre la Maintenance et la Production permettrait de bien gérer cette phase de dégradation de la production qui peut être compensée, si les délais de maintenance sont longs, par le lancement de la production d'un autre type de pièces.

L'**Open shop** : il permet de fabriquer différents produits et autorise diverses séries d'opérations sans contrainte de précedence au niveau des gammes de fabrication. Nous l'illustrons par le schéma ci-dessous représentant une gamme logique d'un produit.

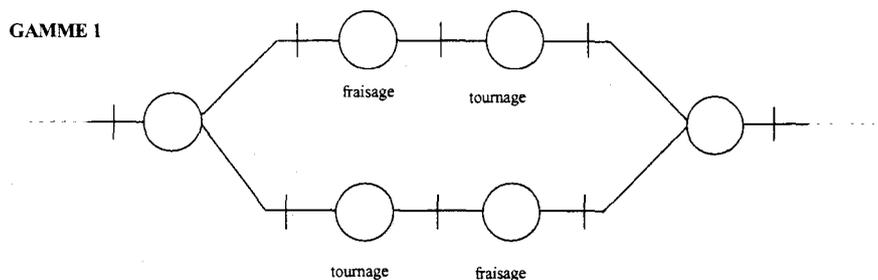


Figure 2-2 : L'Open shop

Dans le cas présent, un degré de flexibilité supplémentaire est obtenu par la possibilité de permuter certaines opérations. Ce degré, bien exploité, pourra être mis à profit par la Maintenance pour le cas échéant différer une intervention. En ce sens, le niveau d'urgence peut être considéré comme moins critique ou moins sensible que dans les organisations précédentes (Job shop et Flow shop).

Afin de synthétiser les différents types de flexibilités que nous venons de voir, nous donnons les définitions suivantes :

Définition 1 :

Une **ressource multi-produits** est une machine qui fabrique plusieurs types de pièces ou un robot qui transporte plusieurs types de pièces.

Une **ressource mono-produit** est une machine qui fabrique un seul type de pièce ou un robot utilisé exclusivement pour le transfert d'un type de pièce.

Définition 2 :

Une **ressource multi-opérations** est une machine polyvalente c'est-à-dire une machine qui délivre plusieurs types d'opérations ou un robot partagé par plusieurs machines.

Une **ressource mono-opération** est une machine qui délivre un seul type d'opération.

Définition 3 :

Une **gamme opératoire** est dite **flexible** si deux ou plusieurs machines mettent en œuvre une même opération pour la fabrication d'un type de produit. C'est le cas des machines M2 et M3 de la Figure 2.3.

Une **gamme opératoire** est dite **non flexible** si la totalité des pièces d'un produit est fabriquée par les mêmes machines dans toute la gamme (Figure 2.4).

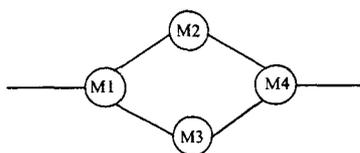


Figure 2-3 : Gamme opératoire flexible



Figure 2-4 : Gamme opératoire non flexible

Pour conclure, on peut dire que la mise en place d'une politique de maintenance dans un SFPM dépend beaucoup du type de système. En effet, selon les flexibilités dont un système peut disposer, on pourra plus facilement gérer la défaillance d'une ressource de production, c'est-à-dire retarder par exemple sa maintenance et l'effectuer à une date de maintenance programmée, pour peu que l'on dispose de redondances au niveau du système.

Le choix d'une politique de maintenance peut être plus orientée vers une Maintenance Prédicative que vers une Maintenance Préventive systématique parce qu'on ne s'autorise à prendre qu'un minimum de risque sur certains équipements dont la défaillance provoquerait une immobilisation partielle sinon totale du système. Dans ces conditions, la surveillance prédictive de certains équipements critiques permet de prévenir leur défaillance, et d'optimiser leurs dates de maintenance. Dans ce contexte, la Sûreté de fonctionnement vient compléter la connaissance que l'on a du système par des critères permettant de fixer les objectifs de la Maintenance sur l'ensemble des équipements.

3. ORGANISATION DU CONTROLE/COMMANDE D'UN SFPM

3.1. Définition du contexte : l'approche CASPAIM II

Dans l'organisation du système de production selon l'approche CASPAIM II, le Contrôle/Commande comporte trois fonctions : la Planification/Ordonnancement, la Supervision et la Commande comme indiqué sur la Figure 2.5 ci-dessous.

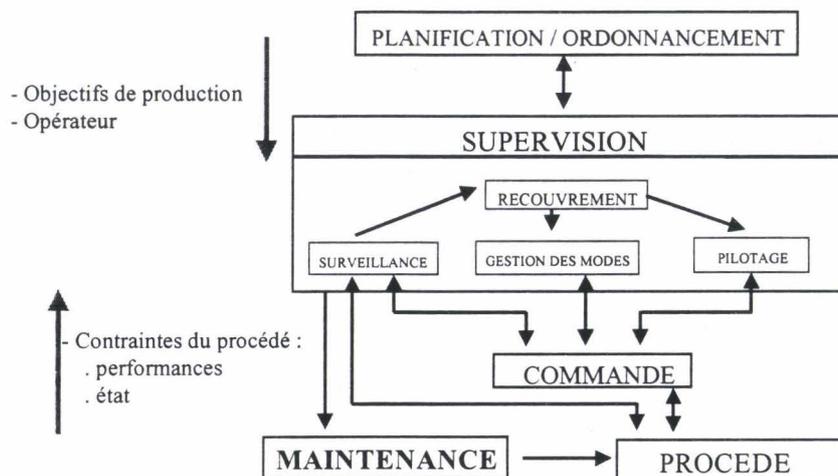


Figure 2-5 : Organisation du Contrôle / Commande selon CASPAIM II

3.1.1. La Planification/Ordonnancement

Au vu des données concernant le système de production c'est-à-dire les ressources (nombre, disponibilités), le planning prévisionnel de maintenance, ainsi que les commandes de fabrication, la Planification fine a en charge de définir au mieux les objectifs de production qui sont spécifiés en terme de quantité, de qualité et de délais.

L'étape d'Ordonnancement permet de fixer les séquences et le nombre d'opérations sur les machines ainsi que les dates de début de chaque tâche. Selon l'approche utilisée, un certain degré de flexibilité peut être conservé et permet en cours de production de gérer les aléas. Nous distinguons globalement trois approches d'ordonnancement : l'approche cyclique, l'approche réactive et l'approche dynamique. Chacune de ces approches [Gentina 97] tente de résoudre la complexité du problème de conduite d'atelier dans un contexte perturbé en essayant de se définir une représentation simplifiée du système à partir d'hypothèses qui peuvent parfois être réductrices.

3.1.1.1. L'approche cyclique

L'approche cyclique [Proth 94], [Camus 97], [Korbaa 98], vise l'élaboration hors ligne d'une commande prévisionnelle à flux de production maximale sous l'hypothèse forte que les pannes sont rares.

Trois autres hypothèses portant sur le mode de production supposent :

- Qu'il n'y a pas de préemption des tâches lors du fonctionnement normal du système (c'est-à-dire qu'une opération de transformation sur une pièce conserve la ressource machine associée jusqu'à la fin de l'usinage de cette pièce).
- Que les durées opératoires sont déterministes.
- Qu'il est admis la possibilité d'écart entre la commande prévisionnelle calculée hors ligne, et le déroulement réel de la production.

La commande ainsi obtenue est répétée autant de fois que nécessaire pour réaliser la demande totale.

L'intérêt pour la Surveillance Prédictive Indirecte dans cette approche est la possibilité d'exploiter cette périodicité pour la définition des fenêtres d'observation du système (Chapitre 3, paragraphe 2.3.2.2).

3.1.1.2. L'approche réactive

La commande réactive utilise généralement des règles locales de décision, et présente l'avantage de pouvoir s'adapter en cas de défaillance ou de dégradation de fonctionnement.

La commande réactive de [Roubellat 88], [Artigues 97] consiste à définir pour l'atelier une séquence de groupes d'opérations permutables. Chaque machine traite à un moment donné une opération appartenant au groupe qu'elle exécute. Cela permet d'avoir une réaction à deux niveaux.

La réaction s'effectue dans un premier temps et dans la mesure du possible au plus bas niveau. Les perturbations sont prises en compte localement dans le groupe d'opérations en cours d'exécution sur la ressource perturbée. La permutation de certaines opérations peut nécessiter le réordonnement des opérations du groupe connaissant l'opération par laquelle il faut remplacer celle perturbée et la position à laquelle il faut la placer de façon à conserver le maximum de flexibilité dans le groupe.

La réaction s'effectue dans un second temps au niveau le plus haut chaque fois qu'une séquence du groupe devient non admissible. Cette non-admissibilité est due à l'impossibilité du plus bas niveau à traiter la perturbation concernée. La méthode nécessite alors une remise en cause globale du plan, et la recherche d'une nouvelle séquence du groupe.

Cette approche permet de réagir aux perturbations de type panne produit (liée à un problème d'approvisionnement) ou qui se rapporte au flux. C'est ce dernier type de perturbations qui nous intéresse dans la Surveillance Prédictive Indirecte.

3.1.1.3. L'approche dynamique

L'approche dynamique [Tawegoum 95] se base sur un ordonnancement prévisionnel (effectué hors ligne) qui fournit les informations d'entrée (dates de début et de fin des opérations, délais, charges des machines) pour effectuer en phase de production la correction dynamique du comportement du procédé à travers la fonction de Pilotage. Les différentes étapes de transformation et de transfert des pièces sont suivies en temps réel, et l'objectif est de réagir le plus tôt possible pour maîtriser une perturbation.

Pour prendre la bonne décision, le Pilotage dynamique organise sa connaissance de la production grâce à deux notions :

- L'**Intervalle de lancement** qui correspond au degré de liberté en fonctionnement normal. Les produits sont regroupés sous forme de lots. Chaque lot correspond à un intervalle de lancement. Un lot est ainsi observé pendant son intervalle de lancement.
- La **Séquence d'opérations** : c'est la projection de l'ordonnancement défini pour l'intervalle de lancement sur chaque ressource transformationnelle. Une séquence d'opérations est donc constituée par un ensemble de produits qui doivent passer sur une machine pendant un intervalle de lancement donné. Ces opérations ne sont pas forcément identiques, car la machine peut être polyvalente mais elles sont liées entre elles par des contraintes temporelles de non-chevauchement.

Deux types de perturbations peuvent apparaître en cours de production. Des perturbations sur des ressources de transformations ou des perturbations sur des ressources de transfert.

Dans le cas d'une perturbation sur une ressource de transformation, il y a quatre modes de correction : la permutation locale des opérations, l'échange d'opération avec une autre machine équivalente, le transfert d'opération sur une autre machine, et dans le cas extrême un réordonnement.

Dans le cas d'une perturbation sur le transfert, la solution proposée consiste à rechercher le plus court chemin entre deux ressources de transformation. On tient compte dans la recherche du meilleur chemin de la dynamique du système de transport (occupation dynamique des tronçons du système de transport) et des tests d'évolution sur les produits à chaque aiguillage ou à chaque butée.

L'intérêt de l'approche dynamique dans le cadre de la Surveillance Prédictive Indirecte est de pouvoir appréhender les possibilités de correction d'une perturbation.

La diversité des approches d'ordonnement que nous venons de présenter attestent de l'intérêt majeur qui est porté à la maîtrise de l'exploitation des SFPM. Mais la complexité de ces systèmes, et les diverses perturbations auxquelles ils peuvent être soumis (pannes, dégradations, famines, saturations) font qu'il y a forcément un compromis à faire entre le besoin d'optimiser la production et celui de faire face aux perturbations. Il y a cependant un paradoxe quand on évalue les moyens déployés pour optimiser l'ordonnement (en particulier la complexité des algorithmes de calculs) par rapport à leur sensibilité aux perturbations. Ce constat justifie notre approche qui vise la maîtrise des perturbations par la Sûreté de Fonctionnement. Ainsi, la Maintenance à travers la Surveillance Prédictive Indirecte est chargée de suivre l'état des ressources en détectant leur baisse de performances ou leur défaillance qui se répercutent sur le flux et la qualité des pièces produites (Chapitre 3).

La difficulté de mener l'ordonnement dans un contexte perturbé provient du fait de vouloir intégrer deux activités complexes et fortement liées que sont la planification et la réaction, et qui présentent des objectifs contradictoires. En effet la planification optimise le lancement des opérations et nécessite un temps de calcul important. La réaction requiert des marges afin de l'aider à prendre des décisions en temps réel. Nous serons confrontés au même problème dans la Surveillance Prédictive Indirecte concernant la réactivité de la détection face à l'ampleur d'une dégradation.

Après la Planification/Ordonnement, nous retrouvons en phase d'exploitation les fonctions de Supervision et de commande, qui participent à l'accomplissement du plan de production, à son bon déroulement et à sa poursuite en cas de défaillance.

3.1.2. La Supervision

La Supervision contrôle et gère les processus. Elle garantit les objectifs de production sur la base des données de l'Ordonnancement et des consignes des opérateurs par ses fonctions de **Pilotage**, de **Gestion des Modes de Surveillance** et de **Recouvrement**.

3.1.2.1. Le Pilotage

Le but du Pilotage est de permettre d'atteindre les objectifs de production en dépit des aléas de production (défaillances,...). Ainsi, il va interpréter les quantités des différents types de pièces à produire (ratios de production) et les délais pour décider compte tenu de l'état courant du système et de la production, de l'entrée des pièces et de la levée des derniers indéterminismes laissés par la commande.

3.1.2.2. La Gestion des Modes

Le but de la Gestion des Modes [Kermad 94] est d'intégrer les différents états, modes opératoires, modes de fonctionnement et modes d'exploitation des composants d'une unité de production en tenant compte des contraintes de comportement ou de fonctionnement du système.

Elle a notamment la charge de :

- Configurer la commande en fonction des informations provenant de la Planification/Ordonnancement (information sur les ressources qui vont être utilisées pendant la production).
- Reconfigurer des ressources en cas de changement de production, pour la prise en compte de nouvelles gammes. En effet, la Gestion des Modes permet de gérer le transitoire entre l'état courant du système et le nouvel état à atteindre. La procédure de reconfiguration après défaillance indique la marche à suivre pour clore la production en cours, pour réorganiser la cellule et enfin reconditionner pour une reprise de la production au mieux (critère de temps).
- Réintégrer une ressource suite à une maintenance (paragraphe 5.1.3.2). Par exemple, quand une machine, suite à une panne ou une modification, est hors ligne, il faut la réintégrer dans sa cellule après réparation. Donc, pour passer d'un mode d'utilisation de type maintenance à un état de production, il est nécessaire d'amener le système dans un état spécifique compatible avec la réintégration de la machine dans la cellule. Cet état peut être caractérisé par une position particulière, par un état (hors énergie par exemple) du procédé, par un état de la partie commande (marche, arrêt, etc.), par une configuration spécifique des dispositifs de sécurité (logiciel et/ou matériel), etc.

Nous avons identifié les familles de modes suivantes :

- Les modes de marche (automatique, cycle/cycle, pas à pas) ;

- Les modes d'arrêt (hors tension, en fin de cycle, dans un état déterminé) ;
- Les modes de fonctionnement (normal, dégradé ou hors service) ;
- Les modes d'exploitation ou d'utilisation (test, production ou maintenance) ;
- Les modes de production (initial, préparation, permanent, clôture) ;
- Et les modes opératoires (spécification des différents types d'opérations effectuées sur les gammes de produits).

Ces familles évoluent a priori en parallèle. On peut citer le cas où un SFPM est en mode d'exploitation production sur un fonctionnement en mode dégradé. Mais elles peuvent être contraintes par le concepteur.

3.1.2.3. La Surveillance

La Surveillance intervient en phase d'exploitation bien qu'elle soit prise en compte dès la phase de conception. Elle regroupe l'ensemble des outils permettant de contrôler l'évolution du comportement du système par rapport à son fonctionnement normal. Elle a en charge de détecter et de localiser les anomalies, dysfonctionnements, et dérives du système de production.

Ses activités portent sur la **Surveillance de la Commande** et la **Surveillance du Procédé**. Dans le cadre de la surveillance du procédé, nous distinguons deux types de surveillance : la **Surveillance Curative** et la **Surveillance Prédictive**.

3.1.2.3.1. La Surveillance de la commande

La Surveillance de la commande est basée sur le principe de Filtrage (à ne pas confondre avec la notion de filtrage en automatique) qui réalise une surveillance des anomalies de la commande [Lhoste 86], [Sahraoui 87], [Combacau 91], [Elkhatabi 93]. Une action n'est transmise au procédé que si elle est compatible avec l'état de ce dernier sinon, un symptôme est généré, suivi d'un gel implicite de la commande. Pour assurer cette compatibilité, une image du procédé est constamment tenue à jour. Cette image est construite sur la base d'un modèle représentant les états différents et les contraintes des composants élémentaires du système physique.

3.1.2.3.2. La Surveillance du procédé : la Surveillance Curative

Elle a en charge la surveillance des défaillances du procédé. On classe les défaillances du procédé suivant deux catégories : les défaillances catalectiques prises en compte par la **Surveillance Curative** [Brunet 90], [Toguyeni 92], et les défaillances progressives prise en compte par la **Surveillance Prédictive** [Mobley 90], [Ly 98a], [Ly 98b]. La notion de

Surveillance Prédicative a été développée dans le cadre de notre approche. Nous verrons au paragraphe 4 .2 comment elle s'intègre au Contrôle / Commande.

La différence entre la Surveillance Curative et la Surveillance Prédicative réside dans le fait que la première attend l'occurrence effective d'une panne, tandis que la seconde l'anticipe. La première travaille ainsi a posteriori tandis que l'autre, et c'est là tout son intérêt, travaille a priori. Néanmoins, la mise en place d'une surveillance prédictive nécessite l'observation "continue" de paramètres qui évoluent d'où la notion de progressivité.

Partant du principe qu'il faut chercher à aider les opérateurs face à la complexité croissante du système de production, et que par ailleurs il faut exploiter la totalité des informations émanant du Contrôle/Commande, un outil de surveillance curative est élaboré sur la base d'une modélisation du procédé. Les principaux modèles utilisés sont : fonctionnel [Toguyeni 92], structurel [Staroswiecki 96], temporel [Toguyeni 92], comportemental [Lhoste 91].

Ces modèles doivent permettre de définir la connaissance nécessaire au diagnostic ainsi que d'étudier l'observabilité globale du système.

La Surveillance Curative comporte deux fonctions : la détection et le diagnostic.

La Fonction de **détection** est fortement dépendante de la contrainte temps réel. Son rôle est de détecter les symptômes et de répondre à la question : la défaillance est-elle critique ou seulement significative ? Dans le cas d'une défaillance significative, les symptômes sont transmis au Diagnostic qui en détermine la cause. Cette cause est ensuite transmise au Recouvrement qui est chargé de mettre en œuvre une procédure de correction en vue d'une poursuite sans les fonctions perdues. Dans le cas d'une défaillance critique, l'information est directement transmise simultanément au Diagnostic et au Recouvrement qui doit mettre en œuvre une procédure de mise en repli urgente.

A partir des symptômes détectés, le **Diagnostic** va déterminer plus précisément la nature de la défaillance, son impact sur le système de production et anticiper sa propagation.

Le Diagnostic se décompose en trois fonctions [Toguyeni 92] :

- La **Localisation** détermine le sous-ensemble fonctionnel défaillant sans forcément se situer au niveau de l'organe défectueux ;
- L'**Identification** des causes qui ont engendré la (ou les) défaillance(s) ;
- Le **Pronostic** ou analyse des conséquences s'intéresse à la propagation des défaillances. Il indique les conséquences inéluctables et mesure les conséquences qui peuvent être anticipées de façon à ne pas solliciter les sous-systèmes défaillants (modification du routage des pièces dans le cas d'un convoyeur partiellement défaillant) et à ne pas propager la défaillance.

3.1.2.4. Le Recouvrement

Sur un changement d'état du système dû à une défaillance, le Recouvrement [Berruet 98a] détermine un nouvel état à atteindre (organisation du système) en tenant compte des objectifs de production.

Cela correspond à un ensemble ordonné d'actions correctives modifiant le comportement du procédé et de la commande de manière à assurer la sécurité et le maintien d'un taux de production acceptable.

Deux cas peuvent se présenter :

- Lorsque la défaillance constatée est critique, on effectue une mise en repli immédiate pour éviter la propagation. La sécurité est assurée mais cela entraîne une indisponibilité partielle ou totale du système mis en cause.
- Dans le cas d'une défaillance jugée significative, le Recouvrement met en place un ensemble d'actions correctives permettant d'effectuer une nouvelle organisation du système de production (par la Gestion des modes) en vue d'une reprise. Pour cela, le Recouvrement réalise les actions suivantes :
 - ♦ Analyse du système (impact de la défaillance, potentialités de l'architecture) de façon à déterminer la capacité du système à continuer une production (il peut arriver qu'il soit nécessaire de mettre en place une nouvelle production),
 - ♦ Détermine les chemins encore accessibles [Berruet 98b],
 - ♦ Choisit la solution la plus optimale selon différents critères (fidélité maximale à l'ordonnancement initial).

Ces actions, émanant des stratégies de recouvrement, permettent de rendre le plus rapidement possible le système disponible. D'où la notion de **réactivité** qui est très importante et qui caractérise le temps écoulé admissible entre la détection d'une défaillance et le début du recouvrement. Ce temps est fonction bien sûr de l'ampleur de la défaillance et des buts privilégiés par la procédure de recouvrement. Aussi, l'impact de la procédure de recouvrement sur le système peut être local ou global.

3.1.3. La Commande

La partie commande a pour fonction d'appliquer l'ensemble des commandes aux différents équipements du procédé en assurant leur séquençement et leur coopération. Elle correspond à la modélisation d'un système de coordination mettant en jeu les opérateurs de la partie procédé en vue d'une production spécifique [Craye 94].

Dans le contexte que nous venons de définir, le rôle de la Maintenance se restreint à agir sur le procédé après détection de défaillances alors qu'il doit être bien plus qu'un outil d'entretien.

Elle doit participer en temps réel à la définition et à la mise en œuvre des objectifs de production à travers les informations qu'elle apporte sur :

- L'état des ressources, et qui permettent à la Planification/Ordonnancement de se fixer des objectifs atteignables.
- Les délais d'interventions, lorsqu'une procédure de reconfiguration doit être engagée suite à une défaillance significative, pour optimiser l'utilisation du système en fonctionnement dégradé.

Notre approche d'organisation du Contrôle / Commande que nous présentons au paragraphe 3.2 montre comment nous intégrons la Maintenance au Contrôle / Commande.

3.2. Proposition de structuration pour une maintenance intégrée

Nous positionnons la Maintenance entre la Planification/Ordonnancement et le procédé comme indiqué sur la Figure 2.6 ci-dessous. Elle a des liens avec de nombreuses les fonctions du Contrôle/Commande (toutes sauf la commande). La définition d'un politique globale de maintenance nous a conduit à développer une nouvelle approche de surveillance prédictive indirecte (Chapitre 3) permettant le suivi des défaillances progressives du système. Elle vient compléter les autres approches de surveillance qui existaient déjà et qui s'intéressent aux défaillance catalectiques du procédé et à celles de la commande. Ces méthodes de surveillance sont destinées à informer aussi bien la Supervision que la Maintenance. Nous avons donc jugé plus adéquat d'en faire une fonction à part, hors de la Supervision.

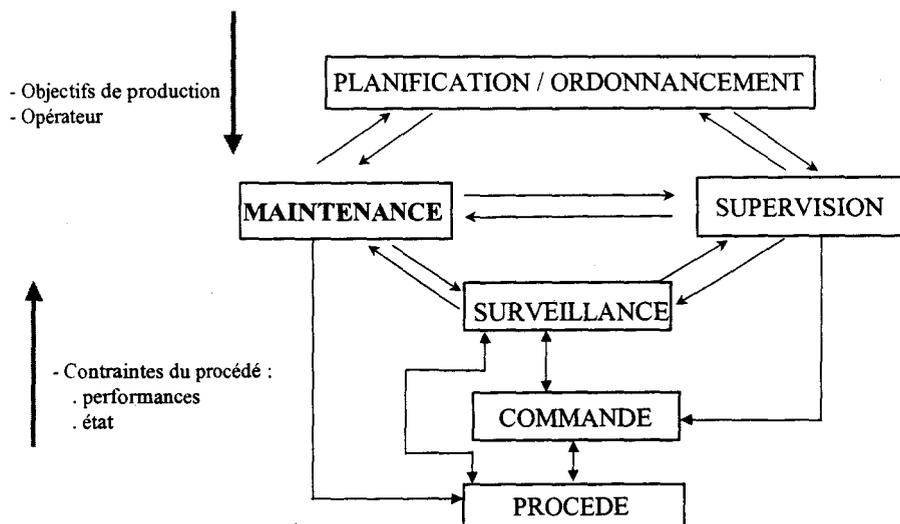


Figure 2-6 : Intégration de la Maintenance au Contrôle/Commande d'un SFPM

En plus des fonctions que nous avons déjà décrites, nous définissons donc une nouvelle approche de Surveillance dite Prédictive qui prend en compte les défaillances progressives, et qui s'intègre au module de surveillance du procédé, et le module de Maintenance.

3.2.1. La Surveillance Prédictive

La Surveillance Prédictive prend en charge les défaillances progressives suivant deux approches [Ly 96] : la **Surveillance Prédictive Directe** et la **Surveillance Prédictive Indirecte**.

Comparée à la Surveillance Curative, la Surveillance Prédictive n'a pas besoin d'une connaissance complète sur chaque élément du procédé. Elle n'utilise pas non plus les mêmes approches.

La Surveillance Prédictive reste circonscrite à quelques équipements critiques dans le cas de la Surveillance Prédictive Directe.

Dans le cas de la Surveillance Prédictive Indirecte, elle vise à établir les liens entre les défaillances et leurs effets sur la qualité ou la quantité des pièces produites. La connaissance qu'elle a des éléments du système peut se limiter aux ratios de production, aux délais et aux critères qualitatifs fixés.

3.2.1.1. La Surveillance Prédictive Directe

La Surveillance Prédictive Directe [Morel 92], [Basseville 87], [Cetim 95] prend en compte les équipements critiques.

Les approches proposées sont fondées sur l'analyse des signaux, l'analyse des données, sur l'étude de processus stochastiques pour connaître l'état réel de l'élément et évaluer sa durée de vie restante. Leur point commun est de supposer que la défaillance est due à un changement dans l'état, c'est-à-dire dans les caractéristiques de fonctionnement de l'équipement surveillé.

L'analyse des signaux est basée sur une comparaison entre les signaux mesurés sur l'équipement et ceux issus d'un modèle théorique de fonctionnement [Basseville 88].

L'analyse des données consiste à utiliser les données issues d'un historique du fonctionnement de l'équipement afin de déterminer les caractéristiques qui différencient le fonctionnement normal d'un fonctionnement proche d'une défaillance [Chu 92].

Les processus stochastiques permettent de modéliser l'évolution de la détérioration d'un équipement. Les conditions de fonctionnement de l'équipement sont représentées par une variable appelée état de l'équipement. Cette variable suit un processus stochastique donné [Sassine 98]. Elle peut prendre un nombre fini ou infini de valeurs, entre "système neuf" et "système en panne". Quand cette dernière valeur est atteinte, l'équipement doit subir une maintenance corrective. Avant la panne, il est également possible (et souhaitable) de décider une maintenance préventive.

La Surveillance Prédictive Directe comporte deux étapes : la détection et le diagnostic qui se réduit au pronostic ; la localisation et l'identification sont implicites étant donné qu'on connaît l'élément surveillé.

3.2.1.2. La Surveillance Prédictive Indirecte [Ly 98a], [Ly 98b]

La Surveillance Prédictive Indirecte (qui fera l'objet de la deuxième partie du présent document) prend en compte tous les types de matériels dont la défaillance se manifeste par une baisse de la qualité ou de la quantité des produits fabriqués. Elle concerne donc plus particulièrement les matériels de la catégorie B (Chapitre 1, paragraphe 5). Elle utilise des paramètres tels que le flux de production [Ly 98a] ou la qualité [Bajic 88], [Yandayan 97]. Par hypothèse une dérive de la qualité ou du flux de production doit être significative d'une dégradation de l'état des éléments. Trois types de défaillances peuvent être à l'origine d'une dérive de la qualité et/ou du flux :

- Une défaillance progressive (c'est le cas par exemple du système hydraulique d'un convoyeur défaillant, d'un outil usé, etc.),
- Une défaillance catalectique¹ (c'est le cas par exemple d'une défaillance d'un système d'aiguillage, etc.),
- Ou une erreur du Pilote (due à un décalage entre la commande prévisionnelle et les performances réelles du système) [Tawegoum 97].

La Surveillance Prédictive Indirecte comporte trois étapes : la détection de la dérive, le diagnostic qui comporte les phases de localisation et d'identification de la ressource qui est à l'origine de la dérive, et le pronostic sur l'évolution de la dérive et le temps restant avant intervention.

3.2.2. La Maintenance

Comme nous l'avons vu au Chapitre 1, nous définissons deux types de maintenance : la Maintenance Corrective et la Maintenance Préventive.

La Maintenance Préventive regroupe les activités de **Maintenance Préventive Systématique** et de **Maintenance Prédictive** dans laquelle on retrouve la **Maintenance Prédictive Directe** et la **Maintenance Prédictive Indirecte**.

La Maintenance Prédictive Directe regroupe les activités de maintenance effectuées sur la base d'une Surveillance Prédictive Directe.

La Maintenance Prédictive Indirecte regroupe les activités de maintenance effectuées sur la base d'une Surveillance Prédictive Indirecte.

¹ Il faut noter que la possibilité de détecter les défaillances catalectiques apporte une redondance à la Surveillance Curative

Le schéma de la Figure 2.7 ci-dessous donne la nouvelle classification des différentes stratégies de maintenance.

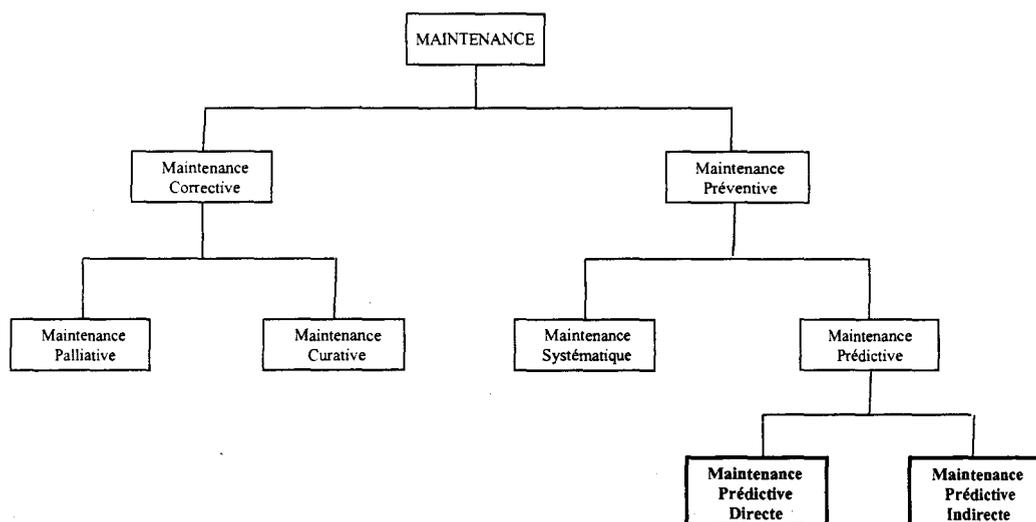


Figure 2-7 : Nouvelle classification des stratégies de maintenance

Nous avons présenté au Chapitre 1 la Maintenance dans un cadre général. Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'organisation des SFPM et à la définition de la place de la Maintenance dans ce contexte. Notre objectif dans les deux paragraphes (4 et 5) qui vont suivre est de montrer que l'optimisation de la Maintenance dans le contexte des SFPM passe par sa structuration (paragraphe 4), pour une meilleure prise en compte des performances du système à travers la définition des liens entre ses différentes fonctions et avec celles du Contrôle/Commande (paragraphe 5).

4. PROPOSITION DE STRUCTURATION DE LA MAINTENANCE DANS LE CADRE DES SFPM

Nous organisons la Maintenance en trois fonctions [Ly 96], [Ly 97] : Une Fonction de **Décision**, une Fonction **Organisationnelle** et une Fonction **Opérationnelle**.

Cette décomposition correspond dans une vision système, à la dissociation entre le Décisionnel, l'Organisationnel, l'Opérationnel et l'Informationnel. L'Informationnel étant assuré ici par la Surveillance au sens large (activités ponctuelles et régulières et activités spécifiques – Chapitre 1, paragraphe 6.1 -) chargé d'apporter des informations sur l'état des ressources du système.

Le Décisionnel va remplir une fonction équivalente à celle du Recouvrement dans la Supervision tandis que l'Organisationnel peut être comparé à la Fonction d'Organisationnelle en ce sens qu'il définit à partir des moyens disponibles l'ensemble des opérations de

maintenance à effectuer sur une période donnée. Quant à l'Opérationnel, sa fonction est de mettre en œuvre les opérations de maintenance.

4.1. La Fonction Décision

C'est l'unité de coordination et de décision de la Maintenance. Elle assure les fonctions suivantes :

- Choix des stratégies de maintenance à appliquer,
- Choix des types de surveillance à mettre en œuvre (visites, inspections, campagnes de mesures, surveillance prédictive, etc.), et de l'exploitation qui doit être faite des informations qui en découlent (maintenance palliative, maintenance curative, réglages, autres mesures, poursuite des activités de surveillance prédictive, etc.),
- Gestion et exploitation de l'historique technique,
- Déclenchement des tâches de maintenance ordonnancées par la fonction Ordonnancement. Il faut noter ici qu'un réajustement (report ou anticipation) des dates de maintenance préventive systématique peut être effectué. C'est le cas par exemple lorsque la tâche de maintenance prédictive est programmée à quelques intervalles de temps d'une tâche de maintenance préventive systématique. La Décision tentera de les regrouper afin qu'elles soient effectuées en même temps,
- Fixation des dates de maintenance non programmée (de façon à avoir un impact minimum sur la disponibilité du système) sur la base des résultats de la Surveillance Prédictive et de l'historique technique,
- Détermination de la durée d'indisponibilité d'une ressource défaillante dont les décisions du Recouvrement peuvent dépendre (Chapitre 2, paragraphe 5.1.3.3),
- Information aux autres fonctions concernées sur les ressources disponibles.

4.2. La Fonction Organisationnelle

Elle gère et planifie les ressources matérielles et humaines nécessaires à la réalisation des opérations de maintenance. Cette activité se traduit par la définition de la durée et de l'ordonnancement des opérations de maintenance à effectuer au cours d'une intervention.

Nous distinguons cinq niveaux d'ordonnancement [Monchy 88] :

- Les prévisions à long terme. Elles correspondent à la notion de "plan de charge". Leur horizon s'étale sur 1 à 5 ans. Ces prévisions permettent en fonction des commandes attendues (espérées), de prévoir globalement une charge de travail en terme d'effectifs et d'investissement en matériel.
- Les prévisions à moyen terme avec un horizon de 1 à 12 mois concernent la définition des charges mensuelles en stocks, pièces, outillages et les modifications à effectuer.

- Les prévisions à court terme sur 1 semaine à 1 mois concernent la définition du planning de lancement. C'est à ce stade que la disponibilité du matériel (matières et outillages) est vérifiée, en même temps que sont préparées les activités de maintenance en terme de stratégie et de personnel.
- Les prévisions immédiates sur 1 heure à 2 jours. Elles concernent les tâches de maintenance corrective, mais aussi la mise en œuvre des tâches de Maintenance préventive. C'est à ce stade que tous les éléments permettant aux exécutants d'effectuer les interventions dans les conditions de temps, de qualité et de sécurité prévues sont pris en compte.
- Le contrôle de l'avancement des opérations de maintenance. C'est ici qu'une étude des écarts par rapport aux prévisions est effectuée, nécessitant une adaptation éventuelle.

Il faut noter que dans un service maintenance, la fonction Organisationnelle est particulièrement lourde et délicate. En effet, les travaux sont variés, et la notion d'urgence est plus fréquente et plus lourde qu'en production compte tenu du caractère sécurité. C'est pour cette raison que la fonction Organisationnelle doit être en relation étroite avec la fonction Décision afin de garantir conjointement les prévisions. En général, si la politique de maintenance choisie et appliquée débouche sur 10% d'interventions correctives, on considère qu'il n'y a pas de problème majeur d'ordonnancement [Monchy 88]. La difficulté reste cependant l'adéquation entre un ordonnancement prévisionnel et une réactivité nécessaire à la prise en compte des défaillances.

Une des réponses à ce problème est de privilégier la communication en temps réel entre les différentes fonctions du système, permettant à la Décision de disposer de toutes les informations pertinentes lui permettant de trier les "urgences" et de définir la meilleure stratégie d'intervention possible. Nous verrons dans la Deuxième Partie de ce document, que l'approche de Surveillance Prédicative Indirecte permet une bonne évaluation des "urgences" dans la mesure où elle permet d'intégrer l'impact d'une défaillance sur la production.

Une autre fonction permettant de répondre également à ce problème, est le Recouvrement. En effet, un dialogue pertinent entre la Décision et le Recouvrement permet de gérer au mieux les "urgences" (paragraphe 5.1.3.3).

4.3. La Fonction Opérationnelle

Elle est chargée d'effectuer les interventions selon le plan établi par la fonction Organisationnelle.

L'ordonnancement des opérations de maintenance aboutit à la délivrance d'un Ordre de travail spécifiant à l'équipe technique concernée le secteur d'intervention, le type d'intervention, les actions à effectuer en respectant les critères de sécurité et les délais spécifiés.

La composition de l'équipe chargée de mener une intervention peut être plus ou moins complexe. Chaque membre de l'équipe peut avoir une tâche bien spécifique qu'il doit effectuer à un moment précis de la procédure d'intervention. Par ailleurs, si une intervention de "routine" (par exemple des activités de maintenance de premier niveau) peut être assurée par un opérateur de production, des tâches plus complexes comme la révision peuvent faire appel à des spécialistes de plusieurs disciplines (électronique, automatique, mécanique etc.)

La Figure 2.8 ci-dessous présente les différentes fonctions de la Maintenance.

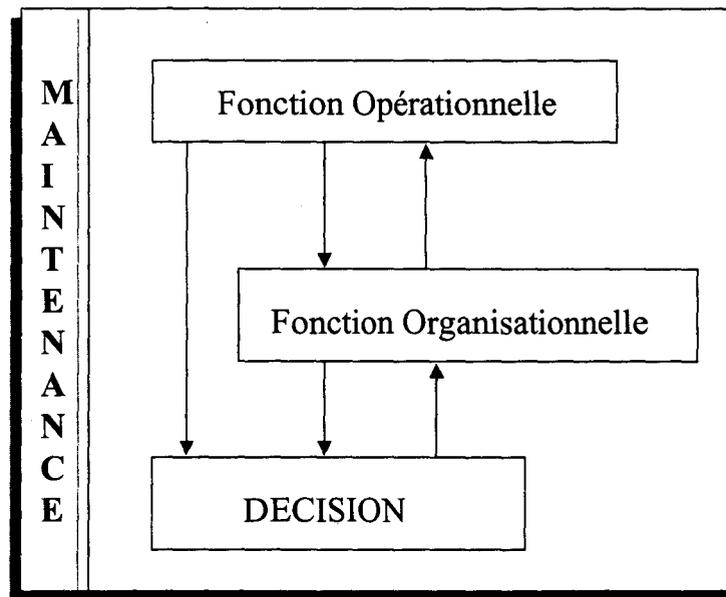


Figure 2-8 : Les différentes fonctions de la Maintenance

5. APPROCHE EN LIGNE DE LA MAINTENANCE

Dans ce paragraphe, nous définissons l'ensemble des relations existant d'une part entre la Maintenance et les autres fonctions du Contrôle/Commande, et d'autre part entre les différentes fonctions de la Maintenance (Figure 2.9).

Nous allons d'abord répertorier l'ensemble des flux d'informations échangés entre la Maintenance et les autres fonctions du Contrôle/commande. Ceci montrera que dans le contexte des SFPM, le choix d'une politique de maintenance ne peut pas se faire sans la prise en compte du contexte réel dans lequel le système évolue. En effet, des caractéristiques (flexibilités) du SFPM et de son évolution, dépendent beaucoup de choix stratégiques qui concernent au premier chef la Maintenance. Inversement, de certains choix stratégiques de la Maintenance, dépendent la mise en œuvre des objectifs de production.

Nous verrons par la suite comment ces flux d'informations sont pris en compte au niveau de la Maintenance par le partage des tâches au niveau de ses différentes fonctions.

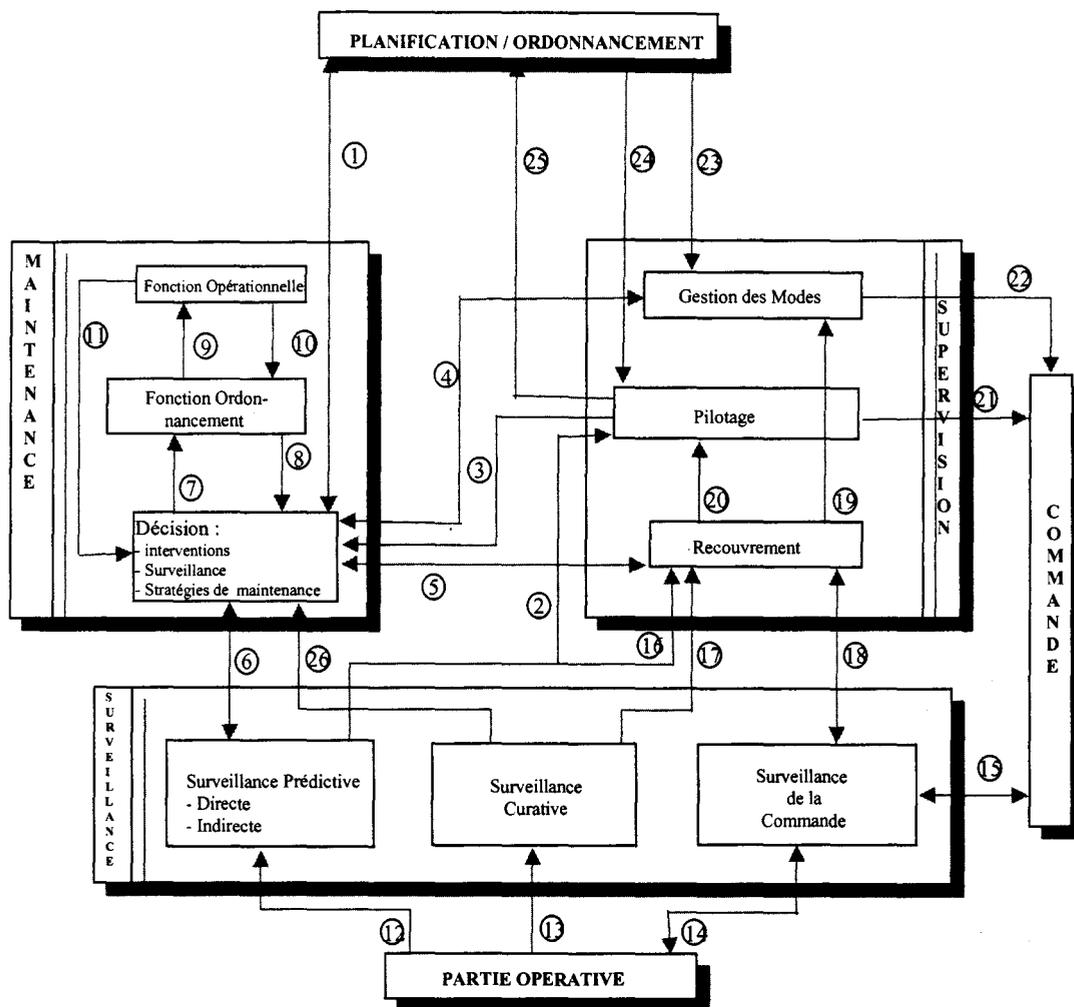


Figure 2-9 : Les différentes fonctions du Contrôle/Commande d'un SFPM

5.1. Flux d'informations échangés entre la Maintenance et les autres fonctions du Contrôle/Commande

5.1.1. Maintenance et Planification/Ordonnancement

Afin d'établir le plan de production et calculer les ratios, la Planification/Ordonnancement a besoin de connaître par la fonction Décision de la Maintenance l'ensemble des ressources disponibles sur l'horizon de production choisi (flèche de retour n°1²).

D'après les opérations de maintenance systématique énumérées au paragraphe 6.1.1 du Chapitre 1, le temps d'indisponibilité d'une ressource varie en fonction du type d'opération de maintenance systématique. Ainsi, une inspection prendra moins de temps qu'une révision de la même ressource. Aussi, nous proposons que chaque opération de maintenance systématique soit classée en :

² La "flèche de retour n°x" est orientée de la seconde fonction citée dans un paragraphe vers la première fonction citée dans le même paragraphe. Par exemple la "flèche de retour n°1 est orientée de la Maintenance vers la Planification/Ordonnancement.

- "**Courte**" lorsque le temps d'indisponibilité de la ressource est de l'ordre du temps de transformation d'un produit par une ressource de transformation c'est-à-dire que le temps d'indisponibilité est négligeable devant l'horizon de production considéré.
- Ou "**longue**" lorsque le temps d'indisponibilité est de l'ordre de l'horizon de production.

En conséquence, les ressources devant subir une opération courte peuvent être considérées comme disponibles pour l'établissement de l'ordonnancement. La Décision devra toutefois préciser à l'Ordonnancement la période de maintenance afin que celle-ci s'impose comme "opération préplacée" [Surenda 98] à prendre en compte par l'Ordonnancement au même titre que les opérations de transformation.

De même, nous proposons que chaque opération de maintenance systématique soit qualifiée de :

- "**potentielle**" lorsque l'opération peut être différée en cas de besoin,
- Ou "**obligatoire**" lorsqu'elle ne peut être différée.

Cette classification permet une négociation entre la Maintenance et l'Ordonnancement qui s'effectuera alors en deux phases. Dans la première phase, l'ordonnancement est fait sur la base des ressources disponibles ou devant faire l'objet d'opérations de maintenance systématique courtes sur l'horizon de production. En cas d'impossibilité d'établir cet ordonnancement, on procède à une relaxation des contraintes ressources dans la deuxième phase. L'Ordonnancement peut ainsi négocier avec la Maintenance (flèche n°1³) :

- le déplacement temporel des opérations courtes de type potentiel,
- La mise à disposition de ressources correspondant à des fonctionnalités spécifiques et devant subir des opérations de maintenance systématique longues de type potentiel.

Si l'ordonnancement demeure infaisable malgré cette relaxation, il faut alors envisager de relaxer les contraintes de charge de production et les délais.

Le problème du report de certaines opérations de maintenance peut se poser après ordonnancement, lorsque la production doit faire face à une demande urgente qui n'avait pas été planifiée ou à la panne d'une ressource. Pour y faire face, on peut, si la production urgente peut s'insérer dans une période d'intervention potentielle, reporter celle-ci tout en conservant le programme de fabrication des autres produits. Autrement, une décision est à prendre par la Planification pour définir des priorités par rapport aux produits les plus urgents. Bien entendu, ceci peut nécessiter un nouvel ordonnancement effectué sur le même principe que précédemment.

³ La "flèche n°x" est orientée de la première fonction citée dans un paragraphe vers la seconde fonction citée dans le même paragraphe. Par exemple la "flèche n°1 est orientée de la Planification/Ordonnancement vers la Maintenance.

5.1.2. Maintenance et Surveillance

Nous avons vu au paragraphe 3.1.2.4.2 les différents types de surveillance du procédé. Les informations qu'ils apportent sur l'état des ressources, permettent à la Maintenance de mener les interventions correspondantes.

5.1.2.1. Maintenance et Surveillance Curative

Les défaillances détectées et localisées lors d'une surveillance curative du procédé font l'objet d'interventions "non programmées" au niveau de la Maintenance (flèche n°26). Ce type de défaillances, dites catalectiques sont jugées significatives ou critiques selon leur gravité évaluée d'un point de vue fonctionnel. Une intervention est mise en œuvre assez rapidement, et sa tâche principale, avant réparation, consiste par des méthodes d'analyse de la sûreté de fonctionnement à déterminer les causes premières de la défaillance (si celles-ci n'ont pas été identifiées lors du diagnostic de la Surveillance Curative). Ce type d'intervention peut être plus ou moins longue compte tenu de l'importance des actions à effectuer, ou parce que cela nécessite une intervention extérieure (spécialiste) ou un approvisionnement en pièces de rechange. Nous verrons à ce propos (paragraphe 5.1.3.3) le rôle du Recouvrement.

5.1.2.2. Maintenance et Surveillance Prédictive

Les défaillances suivies dans le cadre d'une surveillance prédictive sont de type progressif du point de vue du système global. Les opérations de maintenance qui en découlent sont effectuées après que la Décision ait pris connaissance de la nécessité d'intervenir suite aux informations que le pronostic aura données sur l'état de dégradation des ressources surveillées (flèche n°6). Rappelons que les méthodes de surveillance prédictive sont dédiées à la Maintenance parce que les informations qu'elles apportent sur l'état des ressources n'intéressent a priori que la Maintenance, du moins pour ce qui concerne les aspects défaillances progressives. Par conséquent, elles sont décidées et déclenchées par celle-ci. La mise en œuvre correspond au caractère opérationnel. Dans le cas de la Surveillance Prédictive Directe, il s'agit de suivre l'état d'éléments critiques du système. Ce type de surveillance est mis en œuvre en même temps ou après une Surveillance Prédictive Indirecte (Deuxième Partie) sur des ressources dont le niveau de dégradation se répercute sur la qualité des produits fabriqués ou sur leur quantité. Sur la base des résultats de la Surveillance Prédictive (flèche n°6), la Décision peut définir une nouvelle stratégie de surveillance (flèche de retour n°6) qui peut être : une poursuite de la Surveillance Prédictive Indirecte, une Surveillance Prédictive Directe plus fine (réduction des périodes d'acquisition) ou encore une campagne de mesures ponctuelles sur le terrain.

5.1.3. Maintenance et Supervision

5.1.3.1. Maintenance et Pilotage

Lorsqu'une dérive de flux est due à une erreur du Pilotage, les résultats de la Surveillance Prédictive Indirecte sont également transmis au Pilotage (flèche n°2) qui doit rattraper la dérive en mettant en œuvre une procédure de réorganisation des opérations de production. Cette procédure peut être plus ou moins facile selon le type de pilotage adopté.

Dans le cas d'un système de production à pilotage dynamique où les indéterminismes directionnels et organisationnels sont levés en temps réels [Tawegoum 97] une approche mixte d'organisation permet de faire face au problème de la dégradation des performances (paragraphe 3.1.1.3).

Le résultat de cette procédure de réajustement (nouveaux ratios) est transmis à la Décision (flèche n° 3) qui s'en sert pour corriger les périodes d'acquisition de la Surveillance Prédictive Indirecte (flèche de retour n°6).

5.1.3.2. Maintenance et Gestion des Modes

Lorsqu'une tâche de maintenance doit être effectuée sur une ressource, la fonction Décision de la Maintenance sollicite la Gestion des Modes (flèche n°4) qui doit mettre la ressource dans l'état "En test" ou "En maintenance" (cf. les familles de modes d'exploitation au paragraphe 3.1.2.2) (flèche de retour n°4).

En fin de tâche de maintenance, la même procédure est sollicitée afin de réintégrer la ressource dans le système en la replaçant dans le mode production.

Cette procédure n'est valable que pour les ressources subissant une opération de maintenance courte sur l'horizon de production considéré.

5.1.3.3. Maintenance et Recouvrement

Lorsqu'une défaillance catalectique (significative ou critique) est détectée et identifiée par la Surveillance Curative ou lorsqu'une défaillance progressive nécessite l'arrêt d'une ressource, l'information est transmise au Recouvrement (flèche n°17) qui envoie un ordre d'intervention à la Décision (flèche n°5). Cette dernière décide d'une date de maintenance en accord avec la fonction Ordonnancement de la Maintenance, sur la base des disponibilités en matériel, personnel et en pièces de rechange (flèche n°8). Le Recouvrement reçoit de la Décision les informations sur le délai d'indisponibilité de la ressource défaillante (flèche de retour n°5). A partir de ce délai il décide si une procédure de reconfiguration doit être mise en œuvre.

Lorsque le délai d'intervention s'avère long, la poursuite de la production est envisagée en intégrant si possible de nouvelles ressources ou en reconfigurant la commande. Pour la rendre effective, le Recouvrement réalise les actions citées au paragraphe 3.1.2.3. Lorsque le délai d'intervention est court, la production est poursuivie en mode dégradé sans intégration de nouvelles ressources.

Pour l'action d'évaluation prévisionnelle de la quantité de produits qu'il est encore possible de fabriquer, quatre possibilités peuvent exister :

Dans le premier cas, le Recouvrement détermine que tous les types de pièces sont encore réalisables mais dans des proportions réduites compte tenu du taux de chargement des machines. Dans ce cas, l'ordonnancement initial est maintenu avec les mêmes proportions. A la fin du fonctionnement en mode dégradé, seules les quantités à produire n'auront pas été respectées.

Dans le deuxième cas, tous les types de pièces sont également réalisables, mais le délai d'intervention est plus long que celui qu'on peut se fixer pour effectuer un nouvel ordonnancement. Dans ce cas, le Recouvrement décide de continuer la production avec les ratios de l'ordonnancement initial, et demande en même temps un nouvel ordonnancement permettant d'optimiser l'utilisation des ressources. A la fin de l'ordonnancement demandé, la production s'enchaîne sur les nouveaux ratios calculés. Il faut noter ici que l'ordonnancement demandé ne peut se faire sans une connaissance du nombre de pièces qui vont être produites pendant la phase où le système fonctionne avec l'ordonnancement initial. Une fonction de suivi au sein du Recouvrement permet de résoudre ce problème. Ici, le non-respect des quantités produites à la fin du fonctionnement en mode dégradé est moins important que dans le premier cas.

Dans le troisième cas, il s'avère qu'au moins un des types de pièces ne peut plus être produit. La durée d'indisponibilité donnée par la Maintenance détermine l'opportunité de lancer un nouvel ordonnancement pendant qu'une phase de clôture de la production initiale est entamée (la fabrication des pièces déjà présentes dans le système se termine).

Dans le quatrième et dernier cas, le Recouvrement détermine qu'aucun des types de pièces dont la fabrication avait débuté ne peut plus être produit, mais que d'autres types peuvent l'être. Dans ce cas, le Recouvrement informe la Planification afin qu'une nouvelle production soit mise en œuvre.

Les cas que nous venons d'évoquer ne tiennent pas compte du fait que dans ses procédures d'évaluation des potentialités de l'architecture de production, le Recouvrement n'a pas exploité la possibilité d'utiliser des ressources dont la maintenance "potentielle" a lieu dans cette période. A ce moment là, une demande de report de cette date est envoyée à la Maintenance (flèche n°5) qui peut l'autoriser ou pas (flèche de retour n°5).

5.2. Flux d'informations entre les différentes fonctions de la Maintenance

Les interventions de la Maintenance proviennent de trois types d'événements :

- Les tâches de maintenance systématique programmées ;
- Les résultats de la Surveillances Prédicte Directe et de la Surveillance Prédicte Indirecte d'où découlent une fixation des dates de maintenance prédictive correspondantes par la Décision ;
- Les résultats de la surveillance curative qui peuvent induire des tâches urgentes de maintenance.

Ces trois types d'activités de maintenance sont gérés par la Décision. Les dates de maintenance systématique sont fixées hors ligne sur la base des notices techniques des équipements et de l'historique technique. La Décision les déclenche suivant l'échéancier préétabli.

Les dates de maintenance prédictive et corrective sont par contre fixées en ligne par la Décision.

5.2.1. Décision et Fonction Organisationnelle

La Décision envoie à la Fonction d'Ordonnancement (flèche n°7) le plan prévisionnel des tâches de maintenance systématique et les ordres de maintenance prédictive et corrective (opérations qui seront déclenchées à échéance pour confirmer leur mise en œuvre effective). Sur la base des informations sur les ressources matérielles et humaines disponibles pour la réalisation des opérations de maintenance, la fonction Organisationnelle établit le plan de maintenance et envoie un acquittement des tâches à la Décision (flèche n° 8).

Dans le cas où une opération de maintenance ne pourrait être effectuée parce que les délais sont techniquement difficiles à respecter ou faute de matériel ou de personnel, l'information est envoyée à la Décision qui doit décider du report de l'opération de maintenance en question (flèche n°8). Notons que suite à une décision de maintenance, l'activation de la fonction opérationnelle passe par la fonction organisationnelle qui doit garantir la disponibilité des ressources de maintenance avant la mise en œuvre effective de l'opération.

5.2.2. Fonction Organisationnelle et Fonction Opérationnelle

La Fonction Organisationnelle envoie à la Fonction Opérationnelle l'ordre d'exécution des tâches de maintenance sous forme de plan d'intervention (flèche n°9). Elle est en constante relation avec celle-ci pour vérifier l'avancement des opérations (flèche de retour n° 10).

5.2.3. Décision et Fonction Opérationnelle

A la fin de chaque opération de maintenance, la Fonction Opérationnelle transmet à la Décision (flèche n°11) toutes les informations concernant les caractéristiques de l'équipement qui a subi les actions de maintenance sur : son état réel après maintenance, les actions qui ont été effectuées, les éléments qui ont été remplacés, le niveau de fonctionnement après maintenance, etc. Ces informations iront enrichir l'historique technique géré par la Décision qui va ainsi réactualiser certains paramètres tels que le MTBF, le MTTF, etc. en vue d'optimiser le choix des prochaines dates de maintenance et de surveillance.

Les liens entre les autres fonctions du Contrôle/Commande sont répertoriés dans le Tableau 2.1 ci-dessous. Les numéros et les sens des flèches du tableau correspondent aux flèches numérotées de la Figure 2.9.

N° Flèche	Sens	Description du flux
12	↑	Observation du procédé
13	↑	Observation du procédé
14	↑	Observation du procédé
	↓	Commande saine filtrée
15	→	Comptes-rendus filtrés
	←	Commande brute
16	↑	Résultats de la Surveillance Prédictive : défaillances progressives, défaillances catalectiques
17	↑	Résultats de la Surveillance Curative : défaillances catalectiques (nature et sévérité). Si la défaillance est critique, intervention d'urgence : action de mise en repli en vue d'assurer la sécurité, puis actions différées. Si la défaillance est seulement significative : recherche des fonctionnalités et flexibilités restantes [Berruet 98b] et poursuite éventuelle de la production en fonctionnement dégradé sur la base des délais d'interventions fournis par la Maintenance.
18	↑	Résultats de la Surveillance de la commande : incompatibilité entre la commande à appliquer, et l'état de l'élément concerné
	↓	Gel de la commande
19	↑	Application du mode de fonctionnement proposé aux ressources du SFPM (ressources défaillantes et ressources à utiliser)
20	↑	Nouvelles configurations de production (anciens ratios ou ratios recalculés) et règles de priorité
21	→	Stratégie de pilotage
22	↓	Changement de mode de fonctionnement
23	↓	Ressources utilisées
24	↓	Ratios de production
25	↑	- Demande de réordonnement si les délais de maintenance sont longs : fonctionnement en mode dégradé sur la base des nouveaux ratios calculés - Demande d'une autre production

Tableau 2.1 : Flux d'informations échangés entre les différentes fonctions du Contrôle/Commande sauf la Maintenance

6. CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre une approche en ligne de la Maintenance. Cette approche visait à intégrer la Maintenance avec les autres fonctions du Contrôle / Commande.

L'idée directrice était de définir un cadre d'évolution de la Maintenance qui permette de prendre en compte les contraintes de production. Ce cadre d'évolution passe d'abord par une structuration de la Maintenance qui nous a amenés à identifier ses fonctions principales.

Celles-ci s'organisent autour de trois aspects : décisionnel, organisationnel et opérationnel. La seconde phase de la définition de l'approche en ligne de la Maintenance a été la définition de ses liens internes (entre ses différentes fonctions) et externes (avec les autres fonctions du contrôle/commande) en vue de l'exploitation des informations échangées pour améliorer les performances du système. Ces performances se mesurent en terme de capacité à délivrer le service fixé au départ dans les proportions et les délais imposés. Pour atteindre certains niveaux de performances, l'entreprise s'appuie sur ses ressources matérielles et organisationnelles ; ce qui nécessite un service de maintenance qui soit en mesure de participer à l'élaboration et au suivi de la politique de l'entreprise par des activités de sûreté de fonctionnement mais également par des activités informationnelles permettant de répondre aux sollicitations de chaque service de l'entreprise.

Conclusion

Nous avons dans la première partie de ce mémoire abordé la problématique de la Maintenance dans les SFPM. L'analyse que nous avons effectuée autour de ce sujet a permis de rappeler le cadre d'évolution de la Maintenance et d'identifier ses nouvelles prérogatives qui sont désormais loin de sa fonction primaire "d'entretien".

L'évolution de la fonction Maintenance a suivi celle de l'automatisation des SFPM. Qui dit automatisation, dit augmentation de la complexité des systèmes, spécialisation des différentes activités et modification du mode de coopération entre les différentes fonctions du système. La Maintenance bien que devant remplir ses fonctions de base qui sont la surveillance et les interventions, doit également s'adapter à cette nouvelle forme de coopération, en terme de stratégie de maintenance à définir, en terme décisionnel et informationnel. C'est en fait le moyen par lequel la Maintenance doit se mettre "en phase" avec l'autre partie du système dont le rôle est de produire (nous l'avons appelé production) afin de satisfaire ses besoins essentiellement en terme de disponibilité.

Cette problématique générale justifie notre démarche de structuration de la Maintenance. Un des avantages qui découle de cette structuration et de la prise en compte de l'aspect en ligne de la Maintenance, est la possibilité de mieux évaluer ses activités et ses besoins en terme d'outils pour améliorer sa gestion.

Toute la démarche menée dans cette première partie nous semble cependant insuffisante pour aller vers une optimisation globale la Maintenance.

Comme nous avons eu à le souligner, la Maintenance doit disposer de tous les outils lui permettant de prendre les bonnes décisions, dans le bon contexte, et au bon moment. Cela n'est à notre avis possible que dans la mesure où la Maintenance dispose de stratégies de maintenance adaptées à chaque ressources du système, et de moyens lui permettant d'appréhender les besoins et les contraintes **réelles** de celui-ci ; en ne se basant pas seulement sur les exigences que lui soumet la Production. En effet, celles-ci peuvent parfois ne pas refléter le besoin réel qu'il y a d'intervenir sur le système. Beaucoup d'interventions effectuées par la Maintenance sont parfois jugées inutiles ou mal décidées, et peuvent influencer sur les coûts de maintenance.

La deuxième partie de ce mémoire traite de ce sujet. Nous chercherons à optimiser la Maintenance en lui donnant les moyens de mettre en œuvre les stratégies de maintenance adéquates et de porter son propre jugement sur les services qu'elle rend, et de pouvoir ajuster ses stratégies sur la base d'indicateurs quantitatifs lui permettant de déterminer l'influence de l'état des ressources sur la production.

Ainsi, la Surveillance Prédicative Indirecte développée au Chapitre 3 rentre dans le cadre de la définition d'une stratégie de maintenance préventive. Elle représente en même temps un outil d'interprétation commun pour la Production et la Maintenance, permettant de fédérer leurs objectifs et leurs contraintes.

***DEUXIEME PARTIE : La
Maintenance Prédicative :
approche par la Surveillance
Prédicative Indirecte***

Introduction

L'étude de la problématique de la Maintenance dans le cadre des SFPM (Première Partie) nous a conduit à adopter une démarche d'optimisation en deux étapes : la Structuration de la Maintenance et le développement d'une approche de Surveillance Prédictive Indirecte.

Dans le cadre de la structuration de la Maintenance, nous avons abordé l'intégration de ses fonctions au Contrôle/Commande. Cela a permis de répondre à la nécessité d'adaptation de la fonction Maintenance à l'automatisation de plus en plus poussée des SFPM. Désormais, il est inconcevable d'avoir une fonction Maintenance qui ne soit pas "automatisée". Par ailleurs, aux exigences "classiques" auxquelles doit satisfaire la Maintenance (disponibilité, qualité et sécurité), vient s'ajouter une exigence temporelle. En effet, pour qu'un SFPM puisse satisfaire les besoins du client dans le contexte concurrentiel que l'on connaît aujourd'hui, il faut que sa fonction Maintenance soit suffisamment organisée pour pouvoir réagir aux contraintes de la production. L'organisation et l'exploitation des données de la Maintenance en tenant compte de celles des autres services est un moyen pour parvenir à l'automatisation de la Maintenance.

La particularité des SFPM en matière de flexibilité et d'organisation peut être un facteur déterminant dans le choix des stratégies de maintenance à appliquer aux différentes ressources de production. C'est dans ce cadre que nous avons identifié le besoin de mettre en place une stratégie de Maintenance Prédictive Indirecte basées sur une approche produit pour les matériels de la catégorie B dont la dégradation provoque un ralentissement de la production ou une baisse de la qualité (Chapitre 1, paragraphe 5). La Maintenance Prédictive Indirecte est basée sur une méthode de Surveillance Prédictive Indirecte.

La Surveillance Prédictive Indirecte est basée sur un suivi indirect de l'état des ressources par les produits. Mais les informations apportées par la mesure du flux de production ou de la qualité ne permettent pas de discriminer de manière directe l'origine d'une défaillance. Ainsi, la mesure du flux de production ou de la qualité des pièces au niveau même de la machine qui a été en charge de leur fabrication ne représente pas pour nous une approche indirecte car la localisation de la ressource défaillante est immédiate. Notre démarche est basée sur une approche système dont l'objectif est d'établir les interactions entre les différentes entités du système pouvant influencer sur ses performances. C'est ainsi que nous nous intéressons à la notion d'ensembles de ressources. En effet, certains systèmes de production sont organisés en sous-ensembles de ressources (postes, cellules, ...) répartis autour d'un système de transport principal. Notre approche doit être applicable aussi bien au système global qu'aux sous-ensembles qui le constituent. Raisonner sur des sous-ensembles de ressources nous permettra également d'appliquer la Surveillance Prédictive Indirecte à des entités matérielles comme les convoyeurs.

Concrètement, l'objectif de la Surveillance Prédictive Indirecte est, par cette approche complémentaire aux autres méthodes de surveillance, de participer à la stratégie de maintenance prédictive et de répondre aux exigences de la production sur la base d'un repère commun d'interprétation des défaillances avec la Production. En comparant la quantité ou la qualité des pièces fabriquées avec les critères définis au départ, la Maintenance pourra mieux appréhender l'impact d'une défaillance par rapport aux objectifs de production et par conséquent déterminer la date et le type d'intervention le plus approprié.

Cette Deuxième Partie présente l'approche de Surveillance Prédictive Indirecte. Elle est composée de deux chapitres. Rappelons que seule l'approche quantitative est étudiée dans ce mémoire. L'approche qualitative est abordée à la fin de cette partie et son principe général donné en annexe 8.

Le **Chapitre 3** présente la méthode de Surveillance Prédictive Indirecte. L'analyse du système est d'abord effectuée, et les hypothèses de travail posées. La démarche est ensuite présentée en trois étapes : la détection, le diagnostic et le pronostic.

Le **Chapitre 4** répond à un double objectif :

Dans un premier temps, évaluer la pertinence des hypothèses de travail et des solutions retenues pour la conception d'une Surveillance Prédictive Indirecte basée sur l'analyse de flux. L'évaluation en elle même consistera à appliquer la méthode proposée à la surveillance d'un système de production dont nous simulerons le fonctionnement en modes normal et dégradé.

Dans un second temps, donner des solutions pour l'exploitation des indicateurs de performances fournis par la Surveillance Prédictive Indirecte. Nous montrerons, d'une manière générale, comment ces indicateurs sont exploités par certaines fonctions du Contrôle / Commande.

Chapitre 3 : La Surveillance Prédictive Indirecte

1. INTRODUCTION

“ *Un tournant est en train de s'opérer. Désormais, on ne cherchera plus à maintenir une chaudière, mais plutôt à garantir la production d'un volume de vapeur. En assurant une fonction a fortiori, les équipements qui la sous-tendent seront performants. Par contre, en maintenant ces équipements sans une approche globale, l'accomplissement performant de la fonction ne sera pas forcément assuré* ”, [Azevedo 95].

C'est dans cette approche que s'inscrivent nos travaux sur la Surveillance Prédicative Indirecte. Mais il existe d'autres approches dans le cadre de la définition d'une politique de maintenance qui abordent le sujet d'un point de vue des ressources du système considérées individuellement : ce sont des *approches ressources* (AMDEC machine, ...). Ces approches "classiques" aboutissent souvent à la définition d'une maintenance prédictive directe pour chaque ressource. Mais leur inconvénient majeur, c'est qu'elles exigent une instrumentation coûteuse (capteurs spécifiques) et technologiques pouvant être compliquées notamment quand il s'agit d'instrumenter des ressources pour lesquelles cela n'avait pas été prévu lors de leurs conception.

Il existe également des *approches système* basées sur des méthodes classiques (AMDEC système) qui permettent de tenir compte des interactions entre une ressource et son environnement pour caractériser sa fonction délivrée.

Notre démarche consiste en une approche système indirecte, utilisant l'information transmise par les ressources aux produits : c'est donc une *approche produit*. En effet, la Surveillance Prédicative Indirecte est une approche que nous développons dans le cadre de la Maintenance Prédicative en partant du constat que la Maintenance, tout en ayant pour activité de garantir la sûreté des moyens de production, se trouvait confrontée à des objectifs contradictoires. C'est par exemple celui de mener ses activités le plus efficacement possible en terme de service rendu (qualité, disponibilité, sécurité), ce qui peut aboutir à un non-respect des objectifs de la Maintenance en matière de coût. D'où l'intérêt de mener les activités de maintenance dans le cadre d'une politique qui permet de mieux appréhender et de garantir les performances du service rendu par ces mêmes équipements. Par ailleurs, la mise en place d'une Surveillance Prédicative Indirecte provient du besoin de définir une stratégie de maintenance prédictive qui prenne en compte les défaillances progressives du système.

Ainsi nous est apparu le besoin de mener un raisonnement différent des approches classiques : mettre en place une stratégie de maintenance prédictive indirecte par une approche qui offre également la possibilité de partir d'un point commun sur lequel la fonction de production assurée par les ressources du système et la fonction de maintenance dont l'activité porte sur ces mêmes ressources avaient un effet direct et "quantifiable". Ce point commun, ce sont les produits fabriqués. Partant alors de l'objectif final, on peut remonter aux différentes fonctions

délivrées par les équipements et par conséquent lier les objectifs de production à ceux de maintenance.

Ce chapitre présente une des deux approches que nous avons identifiées comme étant les plus aptes à favoriser une approche globale de maintenance prédictive. Il s'agit de l'approche par la quantité produite ou approche quantitative présentée au paragraphe 2 porte sur l'approche quantitative qui représente la deuxième partie de nos travaux. Son principe repose sur le fait de lier les perturbations sur les flux de produits fabriqués à l'état des équipements.

La Surveillance Prédictive Indirecte (approche quantitative) est applicable à des systèmes de production de type Job shop et Flow shop fabriquant des produits en moyenne ou grande série. En effet, elle a besoin pour la détection de valeurs significatives de dérives de flux de pièces, et pour le diagnostic, d'exploiter les redondances du système.

Nous présentons successivement dans ce chapitre les trois étapes de la Surveillance Prédictive Indirecte que sont la Détection, le Diagnostic et le Pronostic.

2. LA SURVEILLANCE PREDICTIVE INDIRECTE : APPROCHE QUANTITATIVE

La majeure partie des études qui ont été menées [Dallery 92], [Buzacott 78a], [Buzacott 78b], [Buxey 73], jusqu'à présent pour mesurer les performances des lignes de production sont orientées vers la définition et l'optimisation du fonctionnement. Les hypothèses considérées portent généralement sur l'état des ressources, les caractéristiques des machines situées à l'entrée et à la sortie de la ligne, les temps opératoires (déterministes ou aléatoires), etc. Ceci pour définir un modèle général (saturé ou non saturé, une ligne de production avec des machines fiables ou non fiables, synchrones ou asynchrones, etc.) permettant d'évaluer les performances du système à partir de paramètres tels que :

- le temps opératoire moyen des machines,
- le MTTF (Mean Time To Failure) des machines,
- le taux de défaillance moyen des machines,
- le MTTR (Mean Time To Repair) des machines,
- le taux de réparation moyen des machines,
- le taux de production isolé des machines,
- le taux de production de la ligne,
- etc.

Ces travaux permettent d'aboutir au dimensionnement d'un système "optimal" permettant d'éviter les phénomènes de blocage et de famine. L'inconvénient de ces études est que l'évolution de

l'état des ressources pendant le fonctionnement n'est pas prise en compte ce qui fait que lorsqu'une défaillance survient, les performances du système sont modifiées, allant jusqu'à compromettre les objectifs de production. La présence de stocks intermédiaires peut dans une certaine mesure limiter l'impact d'une perturbation dans un SFPM. Mais le fait de disposer de stocks intermédiaires à "grande" capacité n'est pas la meilleure façon de gérer les perturbations quand on connaît les coûts que cela engendre. L'intérêt réside plutôt dans le fait de pouvoir les détecter [Cauffriez 96], et mettre en œuvre des procédures d'intervention ou de correction permettant de garantir les objectifs de production. C'est l'approche proposée par la Surveillance Prédicative Indirecte [Ly 98d].

2.1. Le Principe de la Surveillance Prédicative Indirecte

Notre objectif dans le cadre de la Surveillance Prédicative Indirecte, est de surveiller l'état des ressources par les perturbations qu'elles engendrent sur les produits. La connaissance de l'impact d'une défaillance sur la production permet de mettre en œuvre des procédures de correction pour "sauvegarder" les performances du système.

La Surveillance Prédicative Indirecte se décompose en trois étapes : la Détection, le Diagnostic et le Pronostic.

Le principe de la Détection est d'analyser le comportement des ressources grâce au suivi du flux de production. Un indicateur appelé **taux de dérive** est défini (sur la base d'une comparaison entre le flux reçu et le flux délivré pendant une durée d'observation donnée) et permet de caractériser le comportement d'une ressource ou d'un ensemble de ressources (Figure 3.1). Celui-ci est jugé normal ou anormal selon le fait qu'il fabrique ou transporte une certaine quantité de produits dans les délais fixés ou prend plus de temps pour effectuer l'opération.

La Détection (paragraphe 2.3) est appliquée à chaque gamme opératoire, ce qui permet de localiser les ensembles de ressources potentiellement défaillants qui sont générés par le Diagnostic sur la base de règles (Chapitre 3, paragraphe 2.4.3). La redondance d'informations existant entre les différentes gammes opératoires est exploitée grâce à ces mêmes règles afin d'identifier un sous-ensemble minimal qui détermine la (ou les) ressource(s) défaillante(s).

Le Pronostic (Chapitre 3, paragraphe 2.5) permet d'évaluer l'impact d'une dégradation sur le flux de production, et le temps restant avant qu'une intervention ne soit nécessaire.

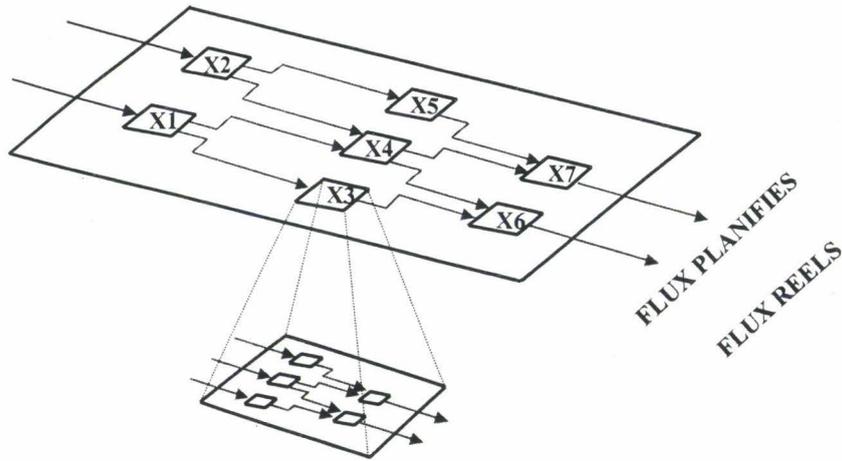


Figure 3-1 : Principe de la Surveillance Prédicative Indirecte

2.2. Hypothèses définissant le cadre de l'étude

Afin d'appliquer la Surveillance Prédicative Indirecte aux SFPM, nous avons choisi d'étudier un système qui fabrique J types de pièces notées P_j , ($j = 1, 2, \dots, J$).

Ces pièces sont fabriquées sur différentes machines (nommées M_i avec i variant de 1 à M) dont les temps opératoires sont constants en fonctionnement normal.

Chaque type de pièce suit une gamme opératoire notée GO_j sur m_j machines du système ($m_j \leq M$). Quand une opération commence sur une machine, elle doit se terminer avant que celle-ci ne puisse en engager une nouvelle (pas de préemption).

Par ailleurs, notre système de production comporte des ressources multi-produits et des ressources multi-opérations (Chapitre 2, paragraphe 2).

Sur la base de ces caractéristiques, nous posons les hypothèses de fonctionnement suivantes :

1. Nous ne considérons pas les systèmes de type assemblage.
2. Le stock d'entrée est toujours alimenté, et il y a toujours de la place sur le stock de sortie.
3. Nous considérons un fonctionnement en régime permanent cyclique du point de vue des produits.
4. Les gammes opératoires sont déterministes c'est-à-dire que l'ordonnancement prévisionnel (établi hors ligne) appliqué au départ détermine les lieux de transformation des produits.
5. Pour la détection, nous considérons un horizon global de production suffisamment grand par rapport aux intervalles d'observation du système. Le comportement du système peut ainsi être suivi sur plusieurs cycles.
6. Une défaillance se manifeste par une dérive du flux de production.
7. Une défaillance a le même effet sur toutes les gammes opératoires utilisant la même opération de la ressource défaillante.

8. Il n'y a pas d'erreurs de mesure sur les capteurs chargés de compter le nombre de pièces produites.

9. Des défaillances multiples sont possibles dans le système et/ou sur une même ressource.

2.3. La Détection

Connaissant les délais de fabrication des pièces par le système, si le nombre de pièces en sortie est inférieur au nombre planifié, il y a nécessairement une dégradation des performances du système. Ce raisonnement appliqué successivement à des sous-ensembles du système doit permettre par recoupement de localiser la ressource défaillante.

L'observabilité du système est obtenue par une disposition optimale de capteurs **qui ne doivent pas se situer sur les machines** elles-mêmes parce que le système peut parfois être composé de cellules et pas uniquement de machines individuelles. Dans ce cas, il devient en effet physiquement impossible de placer un capteur sur un ensemble de ressources. Cela nous ramène à utiliser des capteurs logiques alors que notre objectif est de faire correspondre les capteurs physiques et les capteurs logiques quel que soit le niveau d'abstraction défini (Figure 3.1).

Un capteur physique est un capteur qui délivre une information directement mesurée sur le système tandis qu'un capteur logique délivre une information provenant de la synthèse de plusieurs informations délivrées par des capteurs physiques.

Par ailleurs, l'intérêt de cette contrainte est :

- la minimisation du nombre de capteurs à placer sur le système en ne rajoutant pas de capteurs au niveau de chaque ressource (on ne charge pas le système de points d'informations) ;
- L'identification d'une ressource défaillante par une utilisation judicieuse de l'information existante mais non exploitée ;
- L'exploitation de l'interaction entre les différentes ressources. En effet, notre objectif final n'est pas de surveiller chaque ressource prise individuellement mais le système. C'est donc l'impact d'une dérive sur l'ensemble du système qui nous intéresse.

Ces arguments permettent de comprendre la notion "Indirecte" de la Surveillance Prédicative.

Les capteurs utilisés par la surveillance peuvent être des capteurs dédiés à la surveillance ou simplement des capteurs de contrôle positionnés sur le système pour assurer le séquençage de la commande.

Chaque capteur doit compter le nombre de pièces sortant ou entrant dans un sous-ensemble de ressources durant les cycles d'observation.

2.3.1. Le modèle de flux

Définition 1 :

Considérant une ressource ou un ensemble de ressources, le **flux de production** est défini par le rapport entre le nombre de pièces et le temps.

$$F = \frac{N}{T} \quad (1)$$

Pour la détection des défaillances, nous considérons quatre types de flux.

Le "**flux planifié**" d'une gamme opératoire qui représente le nombre de pièces N_P qui devraient théoriquement être fabriquées suivant la gamme, pendant la durée de production T_P .

$$F_P = \frac{N_P}{T_P} \quad (2)$$

Le "**flux réel**" d'une gamme opératoire qui représente le nombre de pièces qui ont été effectivement fabriquées suivant la gamme pendant la durée de production T_R .

$$F_R = \frac{N_R}{T_R} \quad (3)$$

Ces deux notions prennent respectivement la forme de "flux entrant" et de "flux sortant" lorsque l'on considère les étapes intermédiaires de transformation de la gamme opératoire. En effet, si la première machine de la gamme dérive, le nombre de pièces à l'entrée des machines suivantes n'est plus le nombre de pièces planifiées. Cette éventualité est prise en compte dans l'analyse du comportement des machines suivantes par la notion de "flux entrant". Leur comportement est ainsi évalué sur la base du nombre de pièces qu'elles reçoivent à leur entrée et non pas sur la base du nombre de pièces planifiées qu'elles étaient supposées recevoir.

Ainsi, le "**flux entrant**" dans une ressource ou un ensemble de ressources s'écrit :

$$F_E = \frac{N_E}{T_E} \quad (4)$$

le "**flux sortant**" d'une ressource ou d'un ensemble de ressources s'écrit :

$$F_S = \frac{N_S}{T_S} \quad (5)$$

N_E représente le nombre de pièces entrées dans la ressource ou l'ensemble de ressources pendant la durée T_E .

N_S représente le nombre de pièces sorties de la ressource ou de l'ensemble de ressources pendant la durée T_S .

Dans le cas de la première et de la dernière machine d'une gamme $F_P = F_E$ et $F_R = F_S$.

A partir du flux entrant et du flux sortant, nous définissons le taux de dérive.

Définition 2 :

Le **taux de dérive** caractérise le comportement d'une ressource ou d'un ensemble de ressources par rapport à la tâche (de transformation ou de transfert) qu'elle doit effectuer pendant un intervalle de temps donné.

C'est la différence relative entre le flux entrant et le flux sortant.

$$\alpha = \frac{F_E - F_S}{F_S} = \frac{F_E}{F_S} - 1 \quad (6)$$

Un taux de dérive égal à zéro traduit un bon fonctionnement de la ressource ou de l'ensemble de ressources. En régime permanent le flux d'entrée est égal au flux de sortie ($F_E = F_S$) pour un cycle.

Un taux de dérive différent de zéro traduit une défaillance.

Remarque :

Il faut noter ici que compte tenu de nos hypothèses 3 et 8, le taux de dérive est considéré comme rigoureusement égal à zéro. Dans un cas réel où le mode de conduite du système ne serait pas forcément cyclique avec des mesures susceptibles de comporter des erreurs, on considérera un taux de dérive égal à une valeur seuil avec une certaine variation fonction de l'évolution du flux de production. Ainsi, un taux de dérive supérieur à une valeur seuil traduira un fonctionnement anormal de la ressource, et un taux de dérive inférieur à cette valeur traduira un fonctionnement normal.

Le schéma de la Figure 3.1 illustre le principe d'observation du système pour des ensembles de ressources donnés, et pour lesquels la comparaison de leurs flux entrant et sortant grâce au taux de dérive permet de déterminer s'il y a dégradation de leurs performances ou pas.

2.3.2. Mesure du flux

2.3.2.1. Placement des capteurs

Dans ce paragraphe nous déterminons les points de placement des capteurs en tenant compte des contraintes suivantes :

1. Ne pas placer de points d'observation sur les systèmes de transformation.
2. Conserver la même observabilité du système aussi bien en fonctionnement normal qu'en fonctionnement défaillant.
3. Conserver la même observabilité du système quelle que soit la configuration de production adoptée.
4. Minimiser le nombre de points d'observation sur le système.

Pour présenter notre démarche et expliciter nos contraintes, nous considérons l'exemple du système flexible de production représenté à la Figure 3.2.

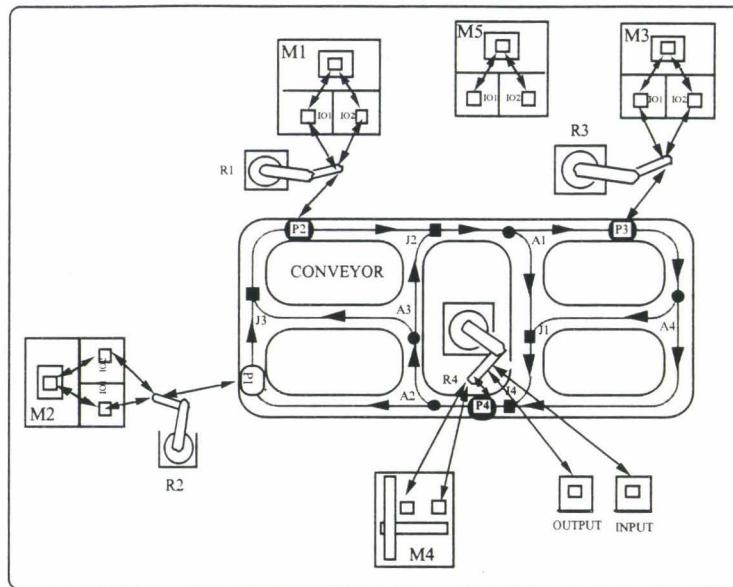


Figure 3-2 : Atelier flexible

Nous devons déterminer la position et le nombre de capteurs à placer sur le convoyeur nous permettant de mesurer les flux induits par les ressources et les points de changement de direction du convoyeur. Les aiguillages et les jonctions sont en effet importants parce qu'ils sont situés au carrefour de plusieurs flux. Un capteur placé en un tel point pourra mesurer plusieurs flux et donc minimiser le nombre de capteurs nécessaires pour les mesures. D'autre part, les aiguillages et les jonctions sont eux-mêmes des éléments actifs du système de transport. Ils sont susceptibles d'être défaillants et donc de perturber les flux de pièces traversant le système.

Nous avons eu l'idée d'utiliser la méthode de Maghout [Kaufmann 68] pour effectuer le placement des capteurs. C'est une méthode basée sur la théorie des graphes, et permettant de trouver des ensembles minimaux de successeurs des sommets d'un graphe sur une distance unitaire.

Une distance unitaire représente la distance séparant un sommet de son successeur direct. La notion de distance unitaire est importante pour nous, dans la mesure où, utiliser l'information provenant d'un capteur situé à une distance supérieure à un de la ressource observée réduirait davantage la rapidité de la détection et introduirait un doute supplémentaire sur l'origine d'une dérive sur le successeur direct du point considéré, et que nous n'observons pas non plus (c'est le problème de la finesse que nous voulons donner au Diagnostic).

Par cette méthode, nous voulons rendre l'ensemble des points caractéristiques de notre système observables (en l'occurrence les machines, les robots, les jonctions et les aiguillages).

Nous liions la notion d'**observabilité** d'un point au flux (entrant et sortant) que nous cherchons à mesurer en ce point. Ainsi, un point est observable si on peut mesurer son flux en plaçant un capteur à son niveau ou si on peut trouver un point lui succédant immédiatement, et par lequel tout ou une partie de son flux passe.

Pour respecter nos trois dernières contraintes, nous devons trouver un compromis entre la minimisation du nombre de points d'observation et notre besoin de conserver une certaine observabilité de l'ensemble des sommets du système aussi bien en fonctionnement défaillant que lors d'un changement de configuration de production.

Ainsi, le sous-ensemble minimal au sens absolu donné par la méthode de Maghout peut ne pas être suffisant pour observer le système dans les deux cas que nous venons de citer. En effet, ce sous-ensemble a été établi sur la base d'un fonctionnement normal pour lequel on peut connaître le flux qui traverse un sommet grâce à la Loi des nœuds. Ce qui devient insuffisant en fonctionnement défaillant parce qu'un sommet a "violé" cette loi en introduisant une perturbation sur ses propres flux.

Quant au changement de configuration de production, nous savons que les chemins qu'empruntent les différents flux provenant d'un point (plus particulièrement les machines) dans un système de production peuvent varier suivant le routage choisi. C'est pour cela qu'en plus de garantir l'observabilité d'un point, il sera important, à partir des résultats donnés par la méthode de Maghout, de choisir le sous-ensemble qui garantisse l'observabilité d'au moins un des flux de chaque point quelle que soit la configuration de production adoptée.

En conclusion, nous dirons que le sous-ensemble extérieurement stable qui sera choisi à partir des résultats donnés par la méthode de Maghout devra successivement :

- Satisfaire la contrainte de ne pas comporter de sommets représentant des systèmes de transformation.
- Permettre la mesure du flux entre deux systèmes de transformation.
- Etre minimal.

La méthode de Maghout est donnée en Annexe 1. Son principe est le suivant : pour un graphe orienté $G = (X, \Gamma)$ donné comportant n sommets définis par l'ensemble $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, il s'agit de rechercher des sous-ensembles T extérieurement stables de X . Cela signifie que pour tout sommet du graphe n'appartenant pas à T , au moins un de ses successeurs direct doit appartenir à T . Ces sous-ensembles de sommets correspondent à diverses alternatives de positionnement des capteurs. Le choix d'un sous-ensemble donné se fera en fonction des contraintes ci-dessus.

Pour expliciter le choix d'un sous-ensemble selon ces critères, nous prenons l'exemple du graphe représenté à la Figure 3.3. Il est composé des sommets $\{In, A, B, C, M1, M2, Out\}$.

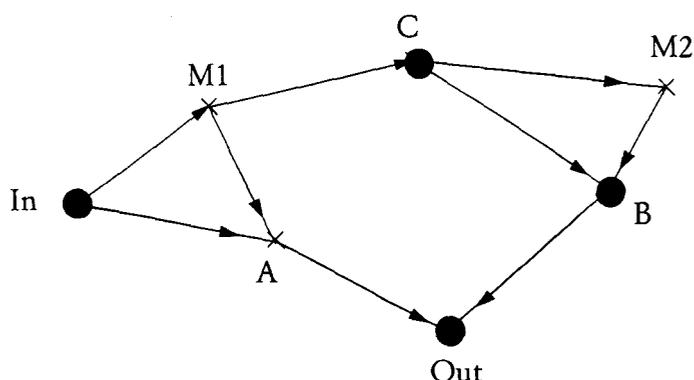


Figure 3-3 : Exemple de graphe

Si nous appliquons la méthode de Maghout à ce graphe nous obtenons les deux sous-ensembles extérieurement stables suivants qui respectent notre contrainte de ne pas placer de capteurs sur les machines M1 et M2 :

$$\{In, C, B, Out\} \text{ et } \{A, B, Out\}$$

En choisissant le sous-ensemble $\{A, B, Out\}$, nous respectons la contrainte minimalité au sens absolu, mais nous ne satisfaisons pas nos contraintes de prise en compte du fonctionnement défaillant et du changement possible de la configuration de production. Pour appuyer nos propos, nous supposons que le système de production modélisé par le graphe de la Figure 3.3 produit une gamme opératoire correspondant à la configuration de production suivante :

$$In - M1 - C - M2 - B - Out$$

En fonctionnement normal, on connaît le nombre de pièces reçues par la machine M2. Ce n'est pas le cas lorsque la machine M1 est défaillante. En effet, puisqu'aucun capteur n'est placé entre M1 et M2, on ne sait pas discriminer la défaillance de M1 de celle (potentielle) de M2.

Par cet exemple, nous voyons que le sous-ensemble $\{In, C, B, Out\}$ permet de satisfaire nos conditions plutôt que le sous-ensemble $\{A, B, Out\}$. En effet, même si la configuration change et que l'on adopte par exemple la suivante :

$$In - M1 - C - B - Out$$

Nous gardons la possibilité d'observer le flux de production avant et après chaque phase de transformation.

Nous pouvons à partir de cet exemple définir la notion d'**ensemble de ressources**.

Définition

Un **ensemble de ressources** équivaut à un regroupement connexe de ressources de transport et de transformation. Il met en œuvre une ou plusieurs macro-opérations.

Par exemple dans la Figure 3.3, on peut regrouper M1 - C - M2 pour constituer un ensemble de ressources.

Appliquons maintenant la méthode de Maghout au système de production représenté à la Figure 3.2. Le (ou les) sous-ensemble(s) minimal (minimaux) de sommets trouvés nous donnera(ont) le nombre et la position des capteurs sur le convoyeur.

Nous représentons le système de production par le graphe de la Figure 3.4. Les machines, les robots, les jonctions et les aiguillages représentent les sommets du graphe. Les tronçons du convoyeur et les opérations de transfert effectuées par les robots représentent les arcs du graphe. Ils sont orientés selon le sens de circulation des pièces dans le système.

Remarque :

Le passage des pièces sur le convoyeur (Figure 3.2) sans transiter par une machine est modélisé sur le graphe ci-dessous par un arc supplémentaire. C'est le cas des arcs (A2, J3), (J3, J2), et (A1, A4).

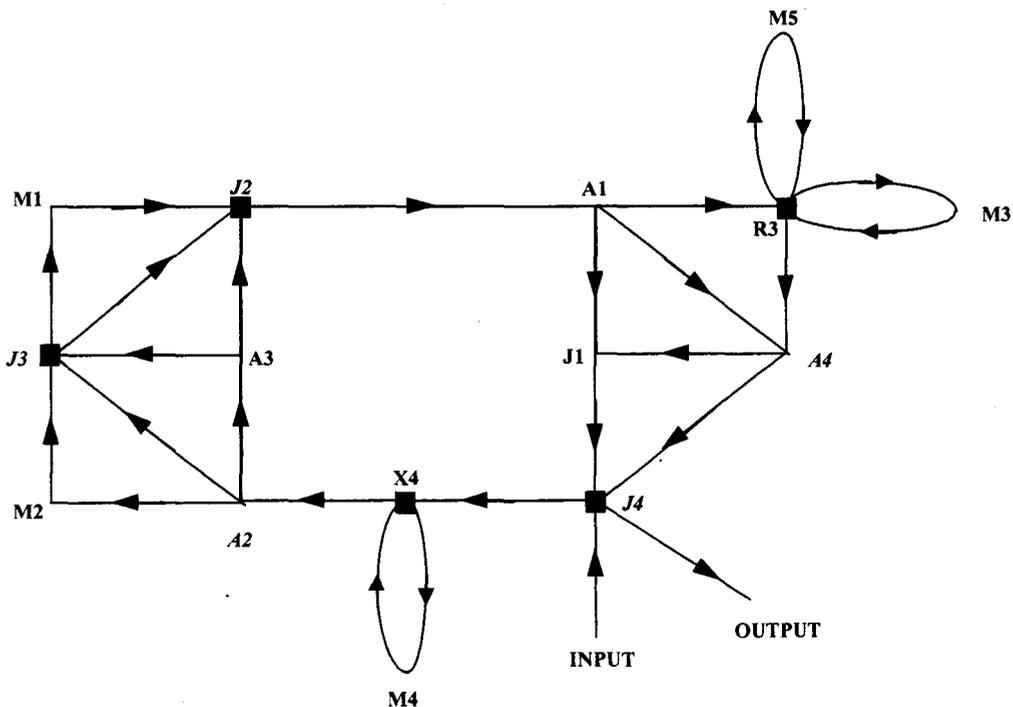


Figure 3-4 : Graphe équivalent

Remarque :

Le sommet X4 de la Figure 3.4 correspond au poste P4 sur la Figure 3.2. Il divise le tronçon J4A2 en deux tronçons J4X4 pour l'entrée des pièces provenant du stock Input, et X4A2 pour le déchargement des pièces provenant de M4.

Afin de simplifier le graphe et la recherche des solutions, nous avons agrégé une machine avec son robot quand celui-ci lui est exclusivement dédié. C'est le cas des robots R1, R2, et R4.

Nous supposons du point de vue du diagnostic que les stocks qui partagent le robot R4 avec la machine M4 ne sont pas susceptibles d'être défaillants parce que ce sont des stocks d'entrée et de sortie sur lesquels nous avons posé l'hypothèse de non-famine et de non-saturation (Paragraphe 2.2, Hypothèse 2). Le cas des stocks intermédiaires aurait par contre été considéré dans le diagnostic. De plus, toujours pour simplifier la recherche de solutions par la méthode de Maghout, nous supposons que R4 ne peut être défaillant, ce qui nous permet de l'agrèger avec la machine M4. Un robot partagé par plusieurs machines est représenté dans le graphe par un sommet supplémentaire. C'est le cas du robot R3.

La méthode de Maghout appliquée au graphe de la Figure 3.4 nous donne une famille de 48 sous-ensembles extérieurement stables (cf. Annexe 1 pour le détail des calculs) dont les 2 suivants respectent notre contrainte de ne pas placer de capteurs sur les machines.

$$\{\text{Output, J2, J3, R3 X4, Input, J1}\} \quad \{\text{Output, J2, J3, R3 X4, J4}\}$$

Les lieux de placement des capteurs que nous avons choisis correspondent aux sommets du sous-ensemble minimal souligné {Output, J2, J3, R3, X4, J4} sauf le sommet Output au niveau duquel nous ne plaçons pas de capteur puisqu'il s'agit d'un stock qui ne peut introduire de perturbations au niveau du flux et que le robot R4 est supposé non défaillant. Ces sommets correspondent sur le graphe de la Figure 3.4 aux sommets marqués par un carré.

Il faut noter que le sous-ensemble extérieurement stable que nous avons choisi, bien qu'il soit minimal au sens absolu, respecte nos deux contraintes d'observabilité en fonctionnement défaillant et en cas de changement de la configuration de production.

2.3.2.2. Mise en œuvre de l'acquisition des données

L'observation du procédé est faite de façon périodique suivant des intervalles de temps constants appelés horizons élémentaires de production (ou cycle de production) suffisamment petits par rapport à l'horizon global de production (voir notations ci-après). Nous verrons comment elle est mise en œuvre lors de la présentation de la partie pratique de ce travail (Chapitre 4, paragraphe 2).

Les capteurs placés aux différents points choisis grâce à la méthode de Maghout doivent compter chaque type de pièce entrant et sortant des ensembles de ressources qu'ils délimitent.

Signalons que les capteurs sont capables de différencier les types de pièces. Un exemple type consiste en des capteurs magnétiques capables de lire et d'écrire sur une étiquette magnétique associée à un produit et sur laquelle est inscrite l'état d'avancement de sa GO.

Le nombre de pièces comptées permet de calculer les flux et taux de dérive correspondants.

Dans un système de production réel, les capteurs sont placés à côté des points que nous avons choisis. Prenons l'exemple du point J4 sur la Figure 3.5. Le capteur placé à côté compte une et

une seule fois la même pièce lorsqu'elle change de ressource de transfert. Par exemple lorsqu'une pièce provenant de la machine M5 passe du tronçon J1J4 au tronçon J4X4 pour aller sur la machine M4.

Les pièces qui entrent dans le système sont comptabilisées dès qu'elles sont chargées par le robot R4. Les pièces sortant du système sont comptabilisées de la même manière.

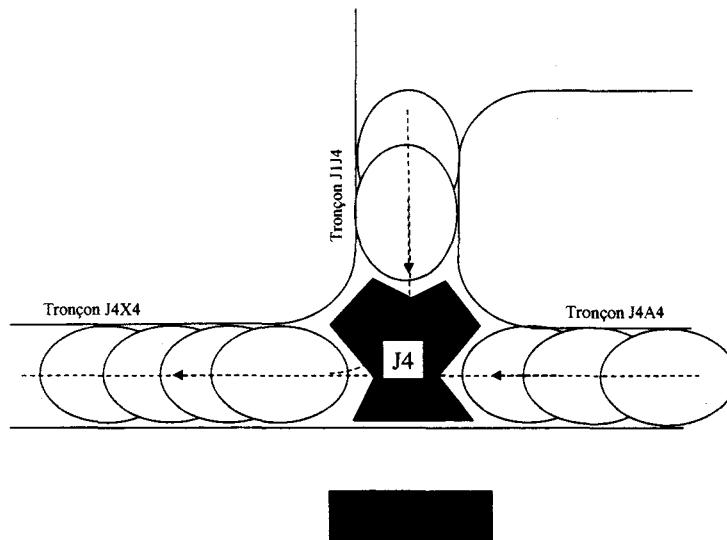


Figure 3-5 : Positionnement des capteurs

On suppose initialement que le système est vide. Un lot de pièces composé de différents types est envoyé périodiquement dans le système pour y subir des opérations de transformations suivant les gammes opératoires qui leur ont été définies. La date d'entrée d'un lot dans le système commence au début de l'horizon élémentaire de production, et la date de sortie prévue se situe théoriquement à la fin de celui-ci (cf. Figure 3.6).

Notations

Soient :

H l'horizon global de production

n_H le nombre d'horizons élémentaires de production

$h_k = H/n_H$ avec $k = 1, \dots, n_H$

h_k l'horizon élémentaire de production ($h_k = h = \text{cste}$)

L_k un lot de pièces de différents types. Il y a n_H lots

U_i^k la date de début d'entrée des pièces d'un lot L_k dans le système

U_f^k la date de fin d'entrée des pièces d'un lot L_k dans le système

$N_k = \text{cste}$ le nombre de pièces dans un lot, L_k

J le nombre de type de pièces à fabriquer avec $j = 1, 2, \dots, J$.

Il y a autant de types de pièces que de gammes opératoires

GO_j la gamme opératoire des pièces de type j

Une gamme opératoire peut être flexible ou non (voir Définition 3 Chapitre 2, paragraphe 2)

V_j représente le nombre de variantes d'une gamme opératoire avec $v = 1, 2, \dots, V_j$

Ces notations seront utilisées dans les paragraphes suivants.

La Figure 3.6 ci-dessous donne le diagramme temporel des différents événements se déroulant pendant la production.

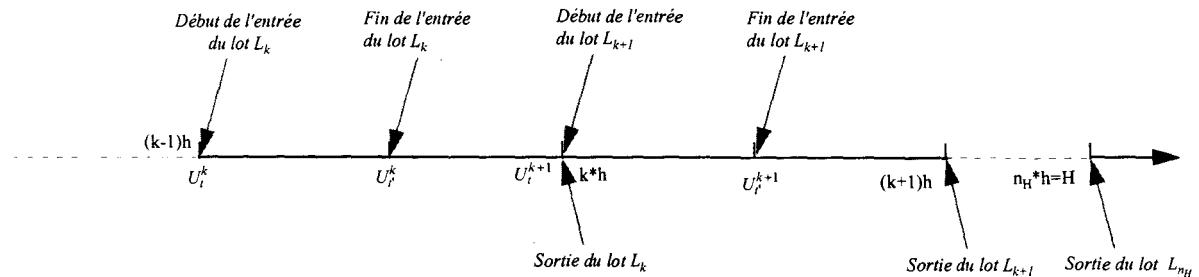


Figure 3-6 : Diagramme temporel des différents événements se déroulant pendant la production

2.3.3. Le principe de la Détection

La mise en œuvre de la détection nécessite la connaissance des données suivantes :

- Les gammes opératoires ;
- La durée des cycles de production ;
- Les ratios de production sur chaque cycle pour chaque type de pièce.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, le but de la détection est de quantifier une dérive du flux de production. Deux hypothèses sont envisageables pour le calcul du taux de dérive. A partir des relations (4) et (5), le flux de production peut être calculé en considérant un temps T constant ou un nombre de pièces N constant.

L'approche N constant consiste à se fixer un nombre de pièces à obtenir au bout d'un temps qui variera en fonction de la cadence de production. On a donc N constant et T variable.

L'approche T constant propose le cas inverse : se fixer une durée au bout de laquelle on évalue le nombre de pièces fabriquées ou transportées. On a alors T constant et N variable. Nous présentons ci-dessous ces deux approches.

Calcul du taux de dérive avec l'hypothèse N constant

Soit N^j le nombre de pièces de type j produites par le système.

Soit $T_{c,E}^j$ (respectivement $T_{c,S}^j$) le temps moyen planifié (respectivement le temps moyen réel) pour que le système produise une pièce de type j . Par conséquent, $N^j T_{c,E}^j$ (respectivement

$N^j T_{c,S}^j$) représente le temps planifié requis (respectivement le temps réel mis) pour fabriquer N^j pièces de type j.

Selon les relations (4) et (5), cela implique que :

$$F_E^j = \frac{N^j}{T_E^j} = \frac{N^j}{N^j T_{c,E}^j} = \frac{1}{T_{c,E}^j} \quad (7)$$

$$F_S^j = \frac{N^j}{T_S^j} = \frac{N^j}{N^j T_{c,S}^j} = \frac{1}{T_{c,S}^j} \quad (8)$$

Par conséquent, le taux de dérive s'écrit :

$$\alpha^j = \frac{T_{c,S}^j}{T_{c,E}^j} - 1 \quad (9)$$

Il représente le taux de dérive du système pour les pièces de type j calculé à N constant.

Dans le cas d'un système composé d'une machine, $T_{c,E}^j$ représente le temps de cycle théorique de la machine pour fabriquer un produit de type j. Il est connu. $T_{c,S}^j$ représente le temps de cycle réel de la machine. Il peut également être évalué grâce par exemple aux comptes rendus de début et de fin de tâche délivrés par la machine.

Raisonné à N constant présente des avantages mais aussi quelques inconvénients.

Un premier avantage est qu'une dérive de flux peut être détectée même si les machines ne fonctionnent pas à leur pleine charge. En effet, nous verrons avec la seconde hypothèse (T = constante) que l'existence de marges sur les machines peut masquer dans une certaine mesure leur dérive.

Un second avantage est que, lorsque l'on raisonne en terme de machine mono-opération, son identification après défaillance est directe. Ce n'est par contre pas le cas lorsque la machine est polyvalente (c'est-à-dire qu'elle délivre plusieurs opérations) ou lorsque l'on a un ensemble de machines. En effet, seule la redondance d'information apportée par l'utilisation des opérations de la machine dans une gamme ou dans les autres gammes opératoires permet d'avoir une idée précise sur l'origine d'une défaillance.

Le désavantage majeur de cette approche est que les organes de transport du type convoyeur ne sont pas pris en compte (parce que les temps de transferts ne sont pas parfaitement connus) alors qu'ils peuvent aussi provoquer des dérives de flux. D'autre part, travailler à N constant est préjudiciable à la réactivité de la surveillance. En effet, si nous prenons par exemple le cas extrême de la panne catalectique, la durée d'obtention du nombre de pièces qui doivent passer devant le capteur de mesure est infinie.

Un second désavantage est la difficulté d'appliquer cette approche à des ensembles de ressources. En effet, la détermination du temps de cycle d'un ensemble de ressources n'est pas

immédiate. Il devra être déterminé sur la base des temps de cycles des ressources qui la composent.

Calcul du taux de dérive avec l'hypothèse T constant

Avec l'hypothèse $T = \text{constante}$, le flux de production est défini en identifiant T à un multiple du cycle de production et nous l'avons appelé horizon élémentaire de production ($T_E = T_S = h$). Les flux entrant et sortant sont calculés à la fin de chaque horizon élémentaire de production.

Pour un type de pièce donné, ils s'écrivent :

$$F_E^j = \frac{N_E^j}{h} \quad (10) \quad F_S^j = \frac{N_S^j}{h} \quad (11)$$

N_E^j représente le nombre de pièces de type j mesuré en entrée du système sur la durée h .

N_S^j représente le nombre de pièces de type j mesuré en sortie du système sur la durée h .

Le taux de dérive s'écrit alors :

$$\alpha^j = \frac{N_E^j}{N_S^j} - 1 \quad (12)$$

h représente ici l'horizon élémentaire de production pendant lequel le système doit produire une fraction de la quantité de pièces définie au départ (ratios de production).

Lorsque l'on considère une gamme opératoire GO_j , son taux de dérive à la fin du k ème horizon élémentaire de production s'écrit :

$$\alpha^j(h_k) = \frac{\Delta N_E^j(h_k)}{\Delta N_S^j(h_k)} - 1 \quad (13)$$

avec $\Delta N_E^j(h_k) = N_E^j(h_k) - N_E^j(h_{k-1})$ où $N_E^j(h_k)$ représente le nombre de pièces totales entrées dans le système à la fin du cycle de production h_k .

$\Delta N_S^j(h_k) = N_S^j(h_k) - N_S^j(h_{k-1})$ où $N_S^j(h_k)$ représente le nombre de pièces totales sorties du système à la fin du cycle de production h_k .

Pour caractériser l'impact de la défaillance d'un ensemble de ressources sur le taux de dérive d'une gamme, nous avons défini le **taux de dérive d'un ensemble de ressources X_i** . Les flux de production à son entrée et à sa sortie sur l'horizon élémentaire h_k considéré pour les pièces de type j s'écrivent respectivement :

$$F_{E,X_i}^j(h_k) = \frac{\Delta N_{E,X_i}^j(h_k)}{h_k} \quad (14)$$

$$F_{S,X_i}^j(h_k) = \frac{\Delta N_{S,X_i}^j(h_k)}{h_k} \quad (15)$$

d'où le taux de dérive de l'ensemble de ressources qui s'écrit :

$$\alpha_{X_i}^j(h_k) = \frac{\Delta N_{E,X_i}^j(h_k)}{\Delta N_{S,X_i}^j(h_k)} - 1 \quad (16)$$

Nous voulons à présent exprimer le taux de dérive de la gamme opératoire j en fonction du taux de dérive des machines qui la composent. Si la gamme est non flexible, l'ensemble des machines qu'elle utilise est équivalent à une machine unique composée de ressources en série. Si la gamme opératoire est flexible, les différentes flexibilités peuvent être traduites par une machine équivalente à l'ensemble des ressources disposées en parallèle. Cette analyse nous amène à définir les taux de dérive équivalents aux taux de dérive des configurations de machines en série ou en parallèle.

Taux de dérive de Machines en série

Soient deux machines M_i et M'_i en série (Figure 3.7).

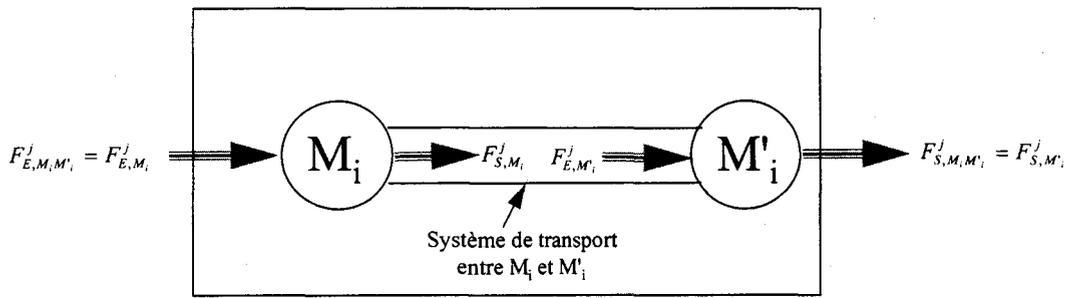


Figure 3-7 : Système équivalent à M_i et M'_i

Le **taux de dérive du système équivalent** s'écrit :

$$\alpha_{M_i,M'_i}^j(h_k) = \frac{\Delta N_{E,M_i}^j(h_k)}{\Delta N_{S,M'_i}^j(h_k)} - 1 \quad (17)$$

$$\alpha_{M_i,M'_i}^j(h_k) = (\alpha_{M_i}^j(h_k) + 1) (\alpha_{M'_i}^j(h_k) + 1) \frac{\Delta N_{S,M_i}^j(h_k)}{\Delta N_{E,M'_i}^j(h_k)} - 1 \quad (18)$$

Le système de transport pouvant être défaillant, on n'a pas forcément $F_{S,M_i}^j(h_k) = F_{E,M'_i}^j(h_k)$. Mais en fonctionnement normal (sous l'hypothèse d'un régime permanent cyclique), on a

$$F_{S,M_i}^j(h_k) = F_{E,M'_i}^j(h_k) \text{ et par conséquent, } \frac{\Delta N_{S,M_i}^j(h_k)}{\Delta N_{E,M'_i}^j(h_k)} = 1.$$

L'équation (23) donne alors le **taux de dérive estimé** :

$$\hat{\alpha}_{M_i,M'_i}^j(h_k) = (\alpha_{M_i}^j(h_k) + 1) (\alpha_{M'_i}^j(h_k) + 1) - 1 \quad (19)$$

L'équation (16) caractérise à elle seule les fonctionnements normal et anormal d'une machine tandis que les équations (18) et (19) caractérisent les fonctionnements normal et anormal d'un

ensemble de ressources comportant les machines M_i , M_i' et le système de transport qui les relie.

Proposition :

En fonctionnement normal, on doit avoir $\alpha_{M_i, M_i'}^j(h_k) = \hat{\alpha}_{M_i, M_i'}^j(h_k) = 0$. Si $\alpha_{M_i, M_i'}^j(h_k) \neq \hat{\alpha}_{M_i, M_i'}^j(h_k)$ alors le système de transport situé entre M_i et M_i' est défaillant.

La formule générale du taux de dérive estimé pour des pièces de type j de m machines en série (en régime permanent) s'écrit :

$$\hat{\alpha}_{M_1, \dots, M_m}^j(h_k) = \prod_{i=1, \dots, m} \left(\alpha_{M_i}^j(h_k) + 1 \right) - 1 \quad (20)$$

Taux de dérive de machines en parallèle

Le taux de dérive réel de deux machines en parallèle s'écrit :

$$\alpha_{M_i // M_i'}^j(h_k) = \frac{\Delta N_{E, M_i}^j(h_k) + \Delta N_{E, M_i'}^j(h_k)}{\Delta N_{S, M_i}^j(h_k) + \Delta N_{S, M_i'}^j(h_k)} - 1 \quad (21)$$

$$\alpha_{M_i // M_i'}^j(h_k) = \left(\Delta N_{E, M_i}^j(h_k) + \Delta N_{E, M_i'}^j(h_k) \right) \left(\frac{\Delta N_{E, M_i}^j(h_k)}{\alpha_{M_i}^j(h_k) + 1} + \frac{\Delta N_{E, M_i'}^j(h_k)}{\alpha_{M_i'}^j(h_k) + 1} \right)^{-1} - 1 \quad (22)$$

La formule générale devient :

$$\alpha_{M_1 // \dots // M_m}^j(h_k) = \left(\sum_{i=1, \dots, m} \Delta N_{E, M_i}^j(h_k) \right) \left(\sum_{i=1, \dots, m} \frac{\Delta N_{E, M_i}^j(h_k)}{\alpha_{M_i}^j(h_k) + 1} \right)^{-1} - 1 \quad (23)$$

Raisonné à $T = \text{constante}$ nous donne la possibilité de détecter les dérives provoquées par les convoyeurs, et de tenir compte de l'influence des zones de stockage intermédiaires. C'est cette approche que nous adopterons dans la suite bien qu'elle présente l'inconvénient de ne pas savoir prendre en compte les marges des machines découlant de l'ordonnancement des tâches. En effet, lorsqu'une machine présente une certaine marge, le retard qu'elle accuse dans la fabrication des pièces est masqué tant qu'il peut être compensé par sa marge. Lorsque la dérive devient détectable, la marge l'atténue, ce qui ne permet pas de mesurer la gravité de la défaillance alors que cette information est très importante pour la Maintenance. Nous présentons au Chapitre 4, paragraphe 3 une méthode analytique permettant de corriger les valeurs de taux de dérive obtenues en tenant compte des marges.

2.4. Le Diagnostic

2.4.1. Principe

Une fois une dérive de flux détectée dans le système, le rôle du diagnostic est d'identifier la (ou les) ressource(s) défaillante(s). Pour cela, nous avons établi des règles de diagnostic (paragraphe 2.4.3) exploitant la redondance apportée par les flexibilités du système. Ainsi, des ensembles de ressources candidates sont générés jusqu'à aboutir à l'ensemble minimal des ressources défaillantes.

Avant de présenter les règles de diagnostic, nous donnons d'abord quelques définitions permettant de caractériser le système de production.

Définition 1 :

Dans le contexte des systèmes de production, un **chemin** relie deux machines du système ou une machine à l'entrée ou à la sortie du système. Un chemin est donc composé de convoyeurs ou de tronçons de convoyeurs et des opérations de transferts effectuées par les robots affectées aux deux machines. Par exemple dans la Figure 3.4, le chemin ((M1, J2), (J2, A1), (A1, R3), (R3, M3)) relie les machines M1 et M3.

Définition 2 :

Pour toute gamme opératoire linéaire, une **étape** est composée d'un ou de plusieurs ensembles de ressources successifs qui marquent les différentes phases de transformation et/ou de transfert d'un produit suivant les points de mesure définis précédemment.

Par exemple dans la Figure 3.4, la gamme opératoire GO_1 de la Figure 3.8 comporte les 7 étapes suivantes :

Etape 1 :

{[Input, J4], R4}

Etape 2 :

Etape 2, {[J4, X4]}

Etape 3 :

Etape 2, { [X4, A2], [A2, M2], R2, OM2,1, [M2, J3]}

Etape 4 :

Etape 3, {[J3, M1], R1, OM1,1, [M1, J2]}

Etape 5 :

Etape 4, {[J2, A1], [A1, R3]}

Etape 6 :

Etape 5, {[R3, M3], R3, OM3,1, [M3, R3]}



Etape 7 :

Etape 6, {[R3, A4], [A4, J1], [J1, J4], R4, [J4, Output]}

La Figure 3.8 résume la notion d'étape. Pour plus de détails sur les tronçons qui composent les différentes étapes, voir la Figure 3-4, page 91.

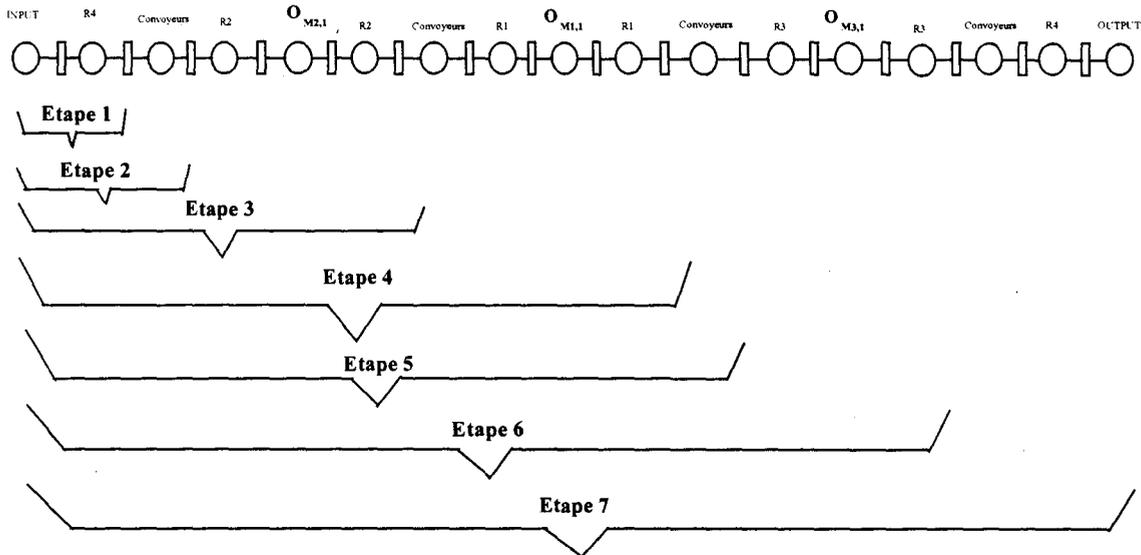


Figure 3-8 : Gamme opératoire agrégée

Définition 3 :

Nous liions à la notion d'étape la notion de "taux de dérive d'une étape d'une gamme opératoire" α_s^j (s représente le numéro de l'étape et varie de 1 à S , avec S le nombre d'étapes).

Soit X_s un ensemble de ressources constituant l'étape s de la gamme GO_j ; le taux de dérive estimé de l'étape s'écrit (cf. paragraphe 2.3.3, équation (20)) :

$$\hat{\alpha}_s^j(h_k) = (\alpha_{s-1}^j(h_k) + 1)(\alpha_{X_s}^j(h_k) + 1) - 1 \quad (24)$$

Cette équation a été établie à partir de l'équation (20) en considérant que l'étape s est composée du système équivalent aux ensembles de ressources jusqu'à l'étape $s-1$, et de l'ensemble de ressources situé entre l'étape $s-1$ et l'étape s .

L'analyse du flux de production porte sur les différentes gammes opératoires à exécuter. Chaque gamme est décomposée en plusieurs étapes que nous avons définies précédemment. Cette décomposition n'étant pas suffisamment fine, une dérive de flux détectée à une étape de la gamme peut avoir été causée par n'importe quel ensemble de ressources traversé par le flux. De plus on sait qu'une dérive de flux peut se propager sur d'autres ressources du système

n'appartenant pas à la gamme. La Figure 3.9 représente la situation. Sachant que le flux de l'ensemble de ressources X est perturbé et qu'il est alimenté par les ensembles de ressources A et B, peut-on établir que l'origine de la perturbation est due à X lui-même ou est-elle induite par A ou B ?

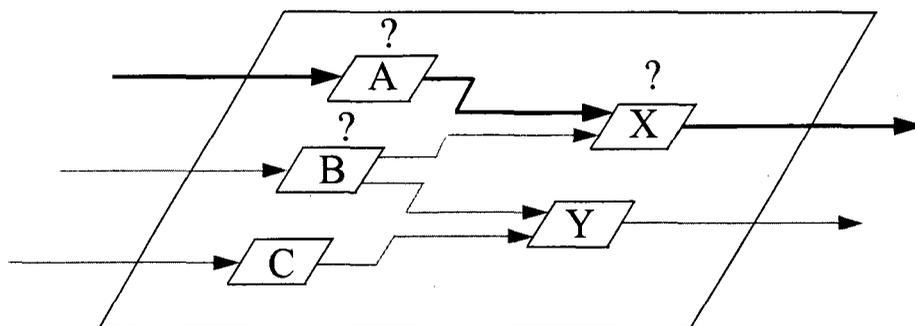


Figure 3-9 : Principe du diagnostic

A partir de ce raisonnement, l'idée est d'exploiter les redondances apportées par les flexibilités du système.

- La flexibilité de production fait qu'une ressource participe à plusieurs gammes opératoires. Par conséquent, si son comportement est anormal, il doit se répercuter sur tous les produits qu'elle fabrique (hypothèse 7, paragraphe 2.2).
- La flexibilité des ressources fait qu'une machine peut délivrer plusieurs types d'opérations (machine multi-opérations). Par conséquent, la dérive d'une machine multi-opérations peut ne concerner qu'une de ses opérations.
- La flexibilité dans l'architecture de production fait que les ressources de transfert (convoyeurs et robots) du système permettent d'acheminer les pièces par plusieurs chemins possibles. Par conséquent, un convoyeur ou un robot peut transférer plusieurs types de pièces ou plusieurs fois le même type de pièce.

Toutes ces informations redondantes vont être exploitées par le diagnostic afin d'identifier la (ou les) ressource(s) qui aura(auront) été à l'origine d'une dérive. Il y a cependant des réserves à émettre à ce stade de notre analyse. On peut les résumer en une question : " le flux d'une gamme opératoire est-il indépendant des flux des autres gammes opératoires ? ". En effet, le comportement d'une ressource peut influencer le flux d'une gamme même si elle n'appartient pas à cette gamme. Cela se justifie par le partage des ressources de transfert par les différentes gammes opératoires. Cette question sera analysée au Chapitre 4, paragraphe 2.

Le Diagnostic qui est proposé ici s'effectue en temps réel. Il s'adapte par conséquent à la configuration du système qui est donnée par les gammes opératoires pendant un horizon global de production donné.

Le taux de dérive de chaque ensemble de ressources est calculé puis comparé au taux de dérive en fonctionnement normal. Les taux de dérive des différentes étapes de chaque gamme opératoire sont également calculés mais cette fois-ci, la comparaison est faite entre le taux de dérive réel calculé et le taux de dérive estimé correspondant. Le résultat de ces comparaisons nous donne l'ensemble des ressources potentiellement défaillantes d'une gamme. Les Règles de diagnostic que nous avons établies permettent d'identifier les ressources défaillantes du système avec comme principe de dissocier les défaillances propres des défaillances induites.

2.4.2. Notions de défaillances induites

Définition

Une défaillance induite indique que le taux de dérive de l'ensemble de ressources considéré est différent de zéro à cause de la perturbation de son flux de production provoquée par la défaillance d'un autre ensemble de ressources. Ainsi, nous appelons le taux de dérive de l'ensemble perturbé **taux de dérive induite** et celui de l'ensemble défaillant **taux de dérive propre**.

Nous distinguons deux types de dérive induite :

- La dérive induite par le procédé physique sur les ensembles de ressources situés en amont de l'ensemble de ressources défaillant.

En effet, une dérive se propage physiquement vers l'amont du système avec la saturation progressive des buffers. Aussi, le taux de dérive induit par la baisse du flux de production des machines avals est proportionnel à la capacité des buffers de sortie des machines amonts.

- La dérive induite sur les ensembles de ressources en avals de celui défaillant du point de vue d'une gamme.

Elle se concrétise par le fait que le rythme de fonctionnement des machines avals (du point de vue des opérations de la gamme) dépend de celui de la machine défaillante. Ainsi, sur l'horizon d'observation considéré, les machines avals recevront les pièces avec un certain retard, ce qui fait qu'à la fin de l'horizon, elles n'auront pas terminé la transformation du nombre de pièces de la gamme entrées dans le système pendant le cycle au cours duquel est survenu la défaillance.

Sur la base de ce raisonnement, nous voulons déterminer la valeur minimale du taux de dérive induit sur les ensembles de ressources avals d'une gamme opératoire en tenant compte de l'influence de la configuration du procédé physique.

Considérons l'ensemble de ressources X_i représenté à la Figure 3.10, et délimité par deux points de mesure du flux : un à l'entrée et un à la sortie. X_i est composé d'une machine M_i , d'un buffer d'entrée B_E et d'un buffer de sortie B_S .

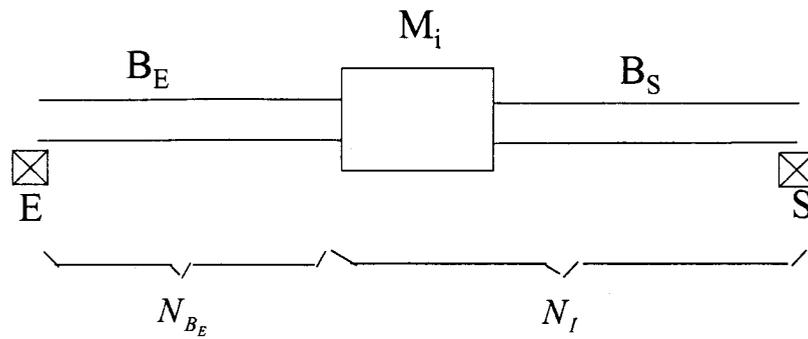


Figure 3-10 : Notion de dérive induite

Soient N_E le nombre de pièces entrées dans l'ensemble de ressources X_i , et N_S le nombre de pièces sorties de l'ensemble X_i à la fin de l'horizon élémentaire h_k .

N_E peut être décomposé en trois valeurs :

- N_S qui représente le nombre de pièces sorties de l'ensemble X_i et passées devant le capteur S à la fin de l'horizon h_k ,
- N_{B_E} le nombre de pièces en attente sur le buffer d'entrée de la machine de l'ensemble X_i ,
- N_I le nombre de pièces en cours de transformation sur la machine et/ou de transfert entre la machine et le capteur de sortie.

On a :

$$N_E = N_S + N_{B_E} + N_I \quad (25)$$

En fonctionnement normal, $N_{B_E} = 0$ et $N_I = 0$ pour le lot de pièces mesuré.

Si $\alpha_{X_i}^j$ représente le taux de dérive de l'ensemble de ressources X_i ,

On a :

$$\alpha_{X_i}^j = \frac{\Delta N_E}{\Delta N_S} - 1 \quad (26)$$

$$\Leftrightarrow \alpha_{X_i}^j = \frac{\Delta N_S + \Delta N_{B_E} + \Delta N_I}{\Delta N_S} - 1 \quad (27)$$

$$\Leftrightarrow \alpha_{X_i}^j = \frac{\Delta N_{B_E}}{\Delta N_S} + \frac{\Delta N_I}{\Delta N_S} \quad (28)$$

Avec α_{B,X_i}^j le taux de dérive propre de X_i

$$\alpha_{B,X_i}^j = \frac{\Delta N_{B_E}}{\Delta N_S} \quad (29)$$

et α_{l,X_i}^j le taux de dérive induit sur X_i par un ensemble de ressources X_k situé en amont de X_i du point de vue de la gamme j .

$$\alpha_{l,X_i}^j = \frac{\Delta N_l}{\Delta N_s} \quad (30)$$

Ainsi, si on peut estimer N_l , on peut déterminer α_{l,X_i}^j .

Connaissant le nombre maximal de pièces pouvant rester sur l'ensemble X_i , on obtient la valeur maximale du taux de dérive induit et donc la valeur minimale du taux de dérive propre. Dans l'exemple que nous venons de traiter si X_i n'est pas défaillant alors $\Delta N_{B_E} = 0$ et $\alpha_{X_i}^j = \alpha_{l,X_i}^j$.

Ceci va nous permettre, d'une étape à une autre de la gamme opératoire, de dissocier le contexte d'une défaillance induite de celui de défaillances multiples (cf. paragraphe 2.4.3, Règle 2).

2.4.3. Règles de diagnostic

Nous avons établi les trois règles ci-dessous.

Notations

Soient :	j	le numéro de gamme
	s	le numéro d'étape dans la gamme ; $s = 1, 2, \dots, S_j$
	m_j	le nombre de machines dans une gamme : $m = 1, 2, \dots, m_j$
	X_i	un ensemble de ressources
	$\alpha_{X_i}^j$	le taux de dérive de l'ensemble de ressources X_i de la gamme j
	α_s^j	le taux de dérive d'une étape s dans la gamme j .

Règle générale

Règle 1 :

Soit $\alpha_{X_i}^j$ le **taux de dérive propre** de l'ensemble de ressources X_i dans la gamme opératoire GO_j . Si $\alpha_{X_i}^j \neq 0$, cela signifie qu'au moins une des ressources de X_i utilisée dans la gamme GO_j est défaillante.

Sinon, aucune des ressources qui composent X_i utilisée dans la gamme GO_j n'est défaillante par rapport à une opération de GO_j .

Remarque :

Lorsque l'ensemble de ressources X_i est réduit à une machine, la Règle 1 porte sur l'ensemble des opérations délivrées par la machine et utilisées par la gamme opératoire j .

Supposons que l'ensemble de ressource X_i équivaut à la machine multi-opérations M_i qui met en œuvre quatre opérations potentielles : $\{O_{M_i,1}, O_{M_i,2}, O_{M_i,3}, O_{M_i,4}\}$. Imaginons deux gammes opératoires GO_1 et GO_2 utilisant respectivement $\{O_{M_i,1}, O_{M_i,2}, O_{M_i,3}\}$ et $\{O_{M_i,2}, O_{M_i,3}\}$.

$\alpha_{M_i}^1 \neq 0 \Rightarrow \{O_{M_i,1}, O_{M_i,2}, O_{M_i,3}\}$ sont potentiellement défaillantes.

$\alpha_{M_i}^2 = 0 \Rightarrow \{O_{M_i,2}, O_{M_i,3}\}$ ne sont pas défaillantes.

On peut donc en conclure que :

- $O_{M_i,1}$ est défaillante

- $O_{M_i,2}$ et $O_{M_i,3}$ ne sont pas défaillantes.

On ne peut rien conclure sur $O_{M_i,4}$ car les productions en cours ne l'utilisent pas.

Prise en compte des défaillances multiples

La répétition de la Règle 1 à tous les ensembles de ressources de toutes les gammes opératoires permet de gérer les défaillances multiples.

Prise en compte des flexibilités du système de transport

Règle 2 :

Si le taux de dérive réel à l'étape $s+1$ (α_{s+1}^j) est différent du taux de dérive estimé ($\hat{\alpha}_{s+1}^j$), alors le système de transport entre les étapes s et $s+1$ est défaillant.

Sinon, il n'est pas défaillant (cf. Proposition, paragraphe 2.3.3)

Prise en compte des défaillances progressives

Règle 3 :

Soit $\alpha_{X_i}^j(t)$ le taux de dérive de l'ensemble de ressources X_i à la date t , avec $\alpha_{X_i}^j(t) > \alpha_{I,X_i}^j$

Si à la date $t' > t$, $\alpha_{X_i}^j(t') > \alpha_{X_i}^j(t)$ alors X_i est défaillant, et sa défaillance s'est aggravée.

Remarque :

Cette règle sera prise en compte par le Pronostic.

2.4.4. L'algorithme de diagnostic

Règle1

Si $\alpha_{X_i}^j \neq 0$ alors
 Au moins une des ressources de X_i est défaillante ;
 Sinon,
 Aucune des ressources de X_i n'est défaillante par rapport aux opérations de GO_j ;
 Fin Si ;

Fin Règle1 ;

Règle2

Si $\alpha_{s+1}^j \neq \hat{\alpha}_{s+1}^j$ alors le système de transport entre les étapes s et $s+1$ est défaillant ;
 Sinon

Le système de transport n'est pas défaillant ;

Fin Si ;

Fin Règle2 ;

Programme principal

Diagnostic

Boucle 1 : Pour chaque gamme

Boucle 1.1 : Pour chaque variante

Boucle 1.1.1 : Pour chaque étape

Règle1 ;

Règle2 ;

Fin Boucle 1.1.1 ;

Fin Boucle 1.1 ;

Fin Boucle 1 ;

Fin Diagnostic ;

2.5. Le Pronostic

Nous avons vu dans les paragraphes précédents que lorsqu'une dérive de flux se produit sur une ressource, elle se propage progressivement aux autres ressources du système.

Le rôle du Pronostic est alors de répondre à trois questions : Comment se propage une dérive dans le système ? De combien de temps dispose-t-on pour intervenir ? Quel est ou sera l'impact d'une dérive sur les objectifs de production ?

Etant donné que la vitesse de propagation de la dérive dépend de la capacité et de la vitesse des convoyeurs intermédiaires, nous allons analyser l'effet d'une dérive sur les différentes ressources du système en définissant les relations analytiques qui modélisent leurs flux.

Connaissant les flux de pièces entrant et sortant d'un stock et sa capacité, on peut calculer le temps au bout duquel le stock sera plein ou vide. On peut alors prévoir la propagation d'une dérive aux différentes machines du système et connaître les délais dont on dispose pour lancer des actions de maintenance. En effet, notre objectif est de pouvoir détecter suffisamment tôt une dérive, d'identifier la ressource qui en est la cause et de calculer le temps dont nous disposons pour intervenir avant que la dérive ne se propage à tout le système et ne cause un blocage du fonctionnement des machines. L'atteinte de cette situation critique entraîne la mise en œuvre de procédures de reconfiguration pouvant aller de l'évacuation des pièces jusqu'à la révision partielle ou complète du plan de production suite aux retards accusés.

L'autre possibilité que nous offre le pronostic d'un point de vue production est celle de connaître le retard qui peut être accusé sur la production à cause d'une dérive. En effet, une dérive peut se produire au niveau du système sans que la situation ne devienne critique. Ici, l'information importante que nous apporte le Pronostic concerne le retard accusé par rapport au plan de production fixé au départ. Par exemple, on peut décider de ne pas rattraper ce retard parce qu'on dispose de stocks de produits finis pouvant satisfaire les besoins du client. Nous

présenterons plus en détail au Chapitre 4, paragraphe 4.2 les types d'interventions pouvant être mis en œuvre par la Maintenance et la Production.

2.5.1. Modélisation des machines et des robots

Pour les machines et les robots, nous utilisons la même approche de modélisation du flux que celle énoncée au paragraphe 2.3.3.

Afin de simplifier notre raisonnement, nous agrégeons les machines avec leurs robots de chargement et déchargement en cas de forte coopération.

Si F_{E,M_i} et F_{S,M_i} désignent respectivement le flux entrant dans l'ensemble machine/robot, et le flux sortant de ce même ensemble, il y a une dérive de flux lorsque

$$\alpha_{M_i} = \frac{F_{E,M_i}}{F_{S,M_i}} - 1 \neq 0 \quad (31)$$

Cette dérive a pour effet de créer des accumulations de pièces sur certains convoyeurs du système, ou de les accentuer. Notre objectif est alors d'analyser la propagation de la dérive en définissant les équations de flux des éléments principaux du système pouvant influencer la propagation de la dérive. Les éléments que nous avons considérés sont les convoyeurs, les stocks, les jonctions et les aiguillages.

2.5.2. Modélisation des convoyeurs et des stocks

Les convoyeurs et les stocks assurent la même fonction de stockage à la différence près que les convoyeurs sont des stocks dynamiques assurant en même temps une fonction de transfert.

Soient :

U_i la taille du stock

$U_{i,max}$ la capacité du stock (taille maximale)

La variation instantanée du nombre de pièces de type j sur le convoyeur s'écrit :

$$\frac{du}{dt} = \sum F_E^j - \sum F_S^j \quad (32)$$

En considérant une période de temps T donnée, le nombre de pièces stockées sur le convoyeur s'écrit :

$$\int_0^T \left(\frac{du}{dt} \right) dt = \int_0^T \left(\sum F_E^j - \sum F_S^j \right) dt \quad (33)$$

en supposant que F_E^j et F_S^j sont constants pendant la période d'observation T , on obtient :

$$u(t) = \left(\sum F_E^j - \sum F_S^j \right) T + U_0 \quad (34)$$

où U_0 représente la valeur initiale du stock.

Pour un stock de sortie dont la valeur initiale est supposée nulle, $F_S^j = 0$; l'équation (38) devient :

$$U = T \sum F_E^j \quad (35)$$

Pour un stock d'entrée $F_E^j = 0$ et on obtient :

$$U = U_0 - \sum F_S^j T \quad (36)$$

2.5.3. Modélisation des jonctions et des aiguillages

Les jonctions permettent de multiplexer sur une voie de sortie les flux arrivant par plusieurs voies d'entrée (Figure 3.11). L'équation des flux en un point de jonction s'écrit :

$$\left(\sum_{i=1, \dots, n} F_{E,i}^j \right) - F_S^j = 0 \quad (37)$$

Avec i qui représente le nombre de voies d'entrée.

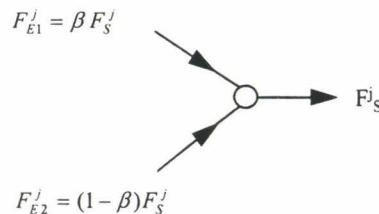


Figure 3-11 : Jonction

Les aiguillages permettent de démultiplexer le flux d'une voie d'entrée sur plusieurs voies de sortie (Figure 3.12). L'équation des flux en un point d'aiguillage s'écrit :

$$F_E^j - \sum_{i=1, \dots, n} F_{S,i}^j = 0 \quad (38)$$

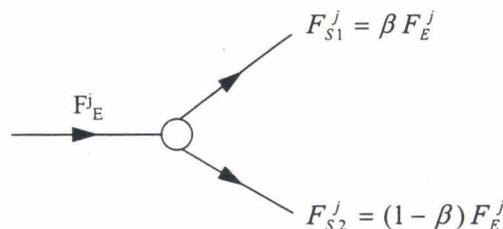


Figure 3-12 : Aiguillage

Ces équations permettent comme nous l'avons énoncé dans l'introduction d'analyser la propagation d'une dérive et d'évaluer son impact sur les objectifs de production.

2.6. Principe de la propagation d'une dérive de flux

Nous voulons analyser l'influence de la configuration physique du système sur la propagation d'une dérive. Pour cela, nous considérons la ligne de production de la Figure 3.13 comportant trois machines. Les cercles représentent les machines et les rectangles les chemins qui séparent les différentes machines. Ils peuvent être des convoyeurs ou des tronçons de convoyeurs.

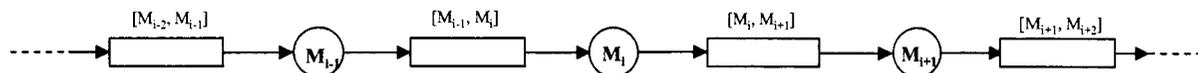


Figure 3-13 : Ligne de production à trois machines

Si un type de produit est fabriqué successivement sur les machines M_{i-1} , M_i et M_{i+1} , les pièces qui le composent ont le cheminement suivant :

$$\{[\text{Entrée}, M_{i-1}], O_{M_{i-1}}, [M_{i-1}, M_i], O_{M_i}, [M_i, M_{i+1}], O_{M_{i+1}}, [M_{i+1}, M_{i+2}], [M_{i+2}, \text{Sortie}]\}$$

En vertu des équations (34) à (38), nous pouvons établir le raisonnement suivant :

Lorsqu'une machine M_i usine une pièce, elle réduit le nombre de pièces sur son chemin amont $[M_{i-1}, M_i]$ et augmente le nombre de pièces sur son chemin aval $[M_i, M_{i+1}]$.

Si la machine prend un temps anormalement long (défaillance progressive) pour usiner une pièce alors que les autres machines fonctionnent normalement, il y a deux effets possibles sur les machines amont et aval selon qu'elles sont plus rapides ou plus lentes que la machine défaillante.

- Si la machine amont M_{i-1} est plus rapide, elle continuera de fonctionner normalement jusqu'à ce que son convoyeur aval soit saturé (cf. la notion de dérive induite par le système physique introduite au paragraphe 2.4.2 et à partir de cet instant, son rythme de fonctionnement se cale sur celui de M_i (Figure 3.14).

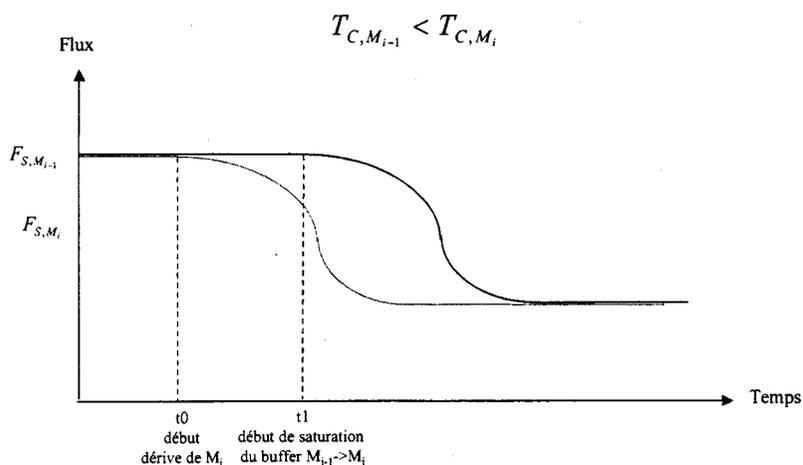


Figure 3-14 : Influence du flux de M_i sur celui de M_{i-1}

- Si M_{i-1} est plus lente, le ralentissement de la machine M_i n'a pas d'effet sur son rythme de fonctionnement tant que son temps de cycle reste supérieur à celui de M_i (Figure 3.15).

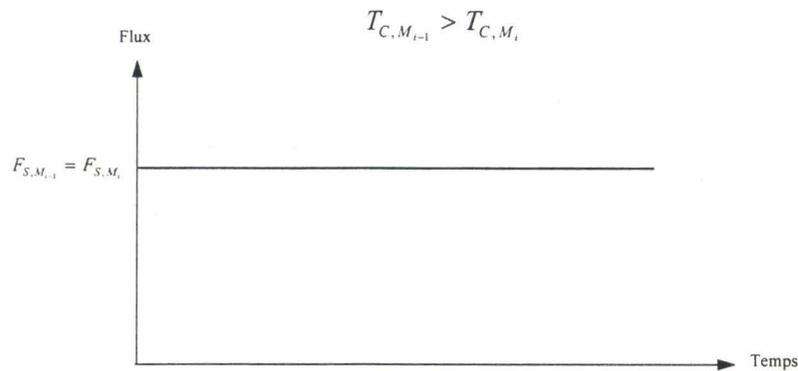


Figure 3-15 : Influence du flux de M_i sur celui de M_{i-1}

- Quant à la machine aval M_{i+1} son rythme de production est imposé par M_i (Figure 3.16) quelle que soit la vitesse relative potentielle des deux machines (cf. la notion de dérive induite sur les machines avales du point de vue d'une gamme).

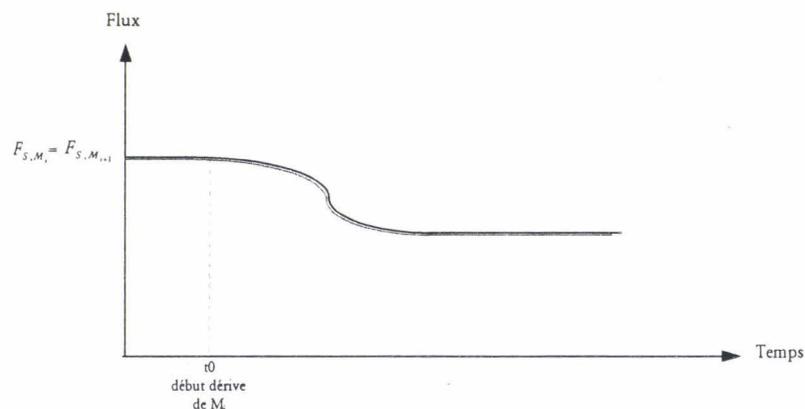


Figure 3-16 : Influence du flux de M_i sur celui de M_{i+1}

Nous constatons par cette brève analyse que plusieurs de facteurs sont à prendre en compte quant aux effets d'une dégradation des performances d'une machine dans un SFPM. Ces facteurs sont les suivants :

- L'architecture du système de production.
- La capacité de stockage des convoyeurs.
- La position de la machine dégradée dans une gamme opératoire, parce qu'une dérive peut se propager en amont et en aval de son point de départ.
- La vitesse de fonctionnement de la machine dégradée par rapport à celle des autres machines de la gamme.

- La charge de fonctionnement d'une machine. Selon que la machine fonctionne à pleine charge (100% de son temps) ou non, le retard qu'elle peut accuser se répercutera plus ou moins sur le reste du système.

3. CONCLUSION

Une nouvelle approche quantitative de la Surveillance Prédicative Indirecte a été présentée dans ce chapitre. Cette méthode a plusieurs fonctions; celles de détecter et de diagnostiquer une dérive de flux, et ensuite d'estimer l'impact de celle-ci sur le système d'un point de vue quantitatif et temporel grâce au Pronostic.

Cette approche a l'avantage d'être simple et peu coûteuse puisqu'elle ne fait appel à aucune information ni méthode d'analyse particulière sur le procédé mis à part celles déjà disponibles. Ses faiblesses résident d'une part dans le fait qu'elle a besoin d'informations redondantes sur le procédé pour effectuer un diagnostic fin, et que d'autre part, elle n'est pas suffisamment réactive comparée à d'autres méthodes de surveillance. Mais ce manque de réactivité doit être interprété plutôt positivement dans la mesure où les résultats de la Surveillance Prédicative Indirecte que ce soit d'un point de vu quantitatif (approche développée ici) ou de la qualité permettent de consolider les connaissances sur le comportement et les performances du procédé. Cela permet de mieux orienter le choix des stratégies de maintenance et de supervision à mettre en œuvre, de mieux les coordonner et de les rendre plus proches des ressources. Cela signifie que pour la Maintenance, certaines tâches seront effectuées en intégrant le point de vue de la Production. Pour la Supervision, des choix contrôlés de conduite et de réajustement de l'évolution du procédé peuvent être faits. Dans le premier cas, il s'agit par exemple de privilégier la qualité ce qui nécessiterait pour les machines un allongement du temps de cycle au détriment de la quantité et dans le second cas de réajuster l'entrée des pièces au rythme de fonctionnement imposé par le ralentissement d'une machine, pour éviter la saturation de certains buffers. Par ailleurs, toujours dans le cadre de la Supervision, il devient possible de mettre en œuvre des procédures de correction des erreurs du pilotage qui proviennent généralement d'une non-conformité entre la commande prévisionnelle et l'état réel du procédé provenant non seulement des perturbations que nous venons d'évoquer, mais également de mauvaises consignes opérateurs, etc.

Sachant que nous ne disposons pas de données réelles sur lesquelles appliquer notre méthode de surveillance prédictive indirecte, nous l'avons évaluée par la simulation du système de production représenté à la Figure 3.2. Nous montrons comment la méthode de détection est utilisée, et comment les résultats obtenus sont exploités dans le cadre du diagnostic et du pronostic.

La Détection n'est pour l'instant effective que lorsqu'une dérive est au moins supérieure aux marges de la machine menante d'une gamme. Nous donnons cependant au Chapitre 4,

paragraphe 3 une méthode analytique permettant de corriger les valeurs de taux de dérive obtenues en vue de mesurer la gravité d'une défaillance. Cette méthode sera approfondie et testée dans le cadre d'une prochaine étude.

L'identification des ressources défaillantes est suivie d'une procédure d'analyse hors ligne (Chapitre 4, paragraphe 4) des éléments qui ont été les plus susceptibles d'avoir causé la défaillance d'une ressource. Ceci permettra de mieux orienter les tâches de maintenance. Ainsi, dans le cas d'un tronçon de convoyeur défaillant composé d'un circuit hydraulique, d'un système d'aiguillage, etc. (éléments sur lesquels la fonction Décision de la Maintenance possède dans sa base de données des informations concernant certains paramètres de bon fonctionnement), l'analyse déterminera que c'est le circuit hydraulique qui aura été la cause la plus probable de la défaillance du tronçon.

Chapitre 4 : Evaluation de la Surveillance Prédictive Indirecte et exploitation des résultats

1. INTRODUCTION

L'approche de Surveillance Prédicative Indirecte que nous avons présentée au Chapitre 3 visait, par un suivi indirect du flux de production, à analyser les performances des ressources.

Ce chapitre montre d'une part comment la Surveillance Prédicative Indirecte est mise en œuvre à travers la simulation d'un système flexible de production, et d'autre part, comment les résultats sont exploités dans le cadre de la Maintenance mais également de la Production. Pour cette dernière, la Surveillance Prédicative constitue un outil de surveillance en ligne des objectifs de production. Hors ligne, elle contribue au retour d'expérience sur les choix et les modes de production ainsi que sur les critères qualitatifs fixés.

Les informations apportées par le Pronostic sur l'impact d'une dérive sur les plans quantitatifs permettent de définir d'une part des indicateurs de performances (paragraphe 4.1) qui vont servir dans une démarche de choix des stratégies de maintenance à mettre en œuvre pour améliorer les performances et le niveau de sûreté de fonctionnement des ressources du système. D'autre part, nous définissons les actions de correction à engager à la suite d'une dérive (paragraphe 4.2) par les différentes fonctions du Contrôle / Commande, notamment la Maintenance. Pour mieux décider des actions de correction à mettre en œuvre, la Maintenance a besoin d'informations précises sur la gravité des défaillances ayant entraîné des dérives de flux. Ainsi, nous proposons au paragraphe 3 une méthode analytique permettant de corriger les valeurs de taux de dérive obtenues après détection. A cause des marges pouvant exister au niveau des machines, elles sont sous-évaluées.

Nous terminons ce chapitre sur l'expertise des différentes stratégies de maintenance, en montrant comment les faire coexister dans un SFPM.

2. EVALUATION DE LA SURVEILLANCE PREDICTIVE INDIRECTE

Afin de vérifier la théorie que nous avons présentée au Chapitre 3, nous avons effectué une simulation du système de production [Monsef 96], [Cernault 88] de la Figure 4.1 sous Witness [Witness 94].

Witness est un logiciel de simulation de systèmes continus et discrets. Il offre la possibilité de simuler le fonctionnement d'un système de production grâce à deux éléments de modélisation : les Eléments Physiques et les Eléments Logiques.

Les Eléments Physiques permettent de définir et de représenter tous les éléments physiques du procédé (machines, robots, convoyeurs, stocks, pièces, opérateurs, etc.).

Les Eléments Logiques permettent de définir la dynamique du procédé à travers la logique de routage et l'utilisation des ressources (exploitation et partage).

Le simulateur offre également la possibilité de contrôler (rapports) ou d'agir sur les performances du système en introduisant des commandes spécifiques (pannes, changement de valeurs de variables des éléments physiques, etc.) grâce à des expressions (formules) ou des actions (programmes).

Enfin, le simulateur offre plusieurs modes d'exécution d'une simulation en mode pas à pas, normal ou accéléré à pas variable ce qui permet de simuler un fonctionnement de plusieurs jours en quelques minutes seulement.

2.1. Mise en œuvre de la simulation

2.1.1. Description du système de production

Nous avons simulé le fonctionnement de l'atelier flexible de la Figure 4.1. Trois types de pièces P1, P2 et P3 sont fabriquées simultanément suivant les gammes GO₁, GO₂ et GO₃ (Figure 4.2).

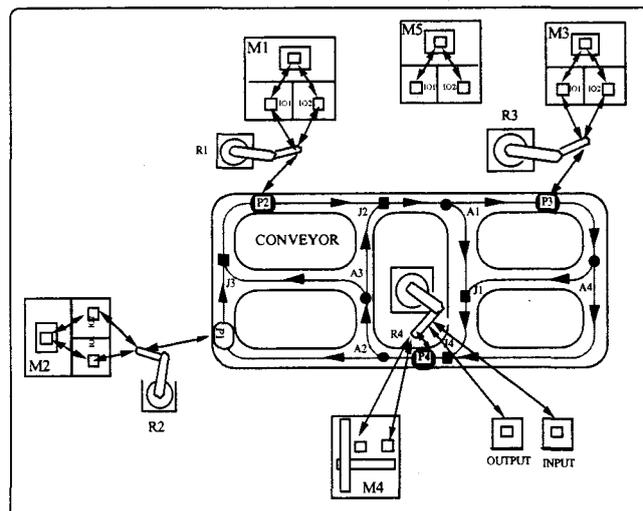


Figure 4-1 : Atelier flexible

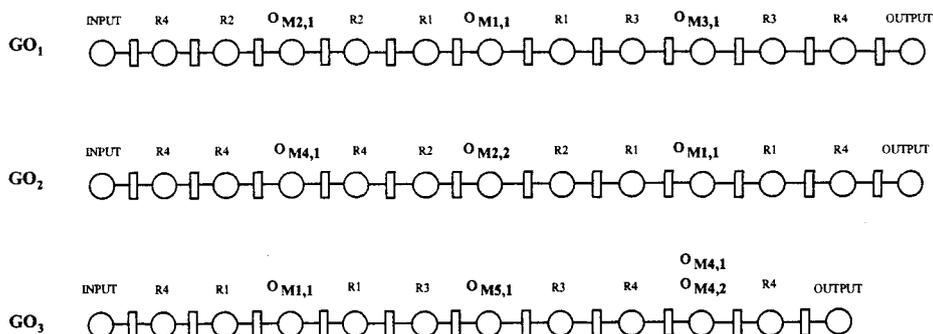


Figure 4-2 : Gammes opératoires agrégées des pièces P1, P2 et P3

On dispose de 5 machines M1, M2, M3, M4 et M5. Chaque machine dispose d'un buffer d'entrée et d'un buffer de sortie unitaires.

Pour la manutention, les robots R1 et R2 sont dédiés à chacune des machines M1 et M2. M3 et M5 se partagent le robot R3. Le robot R4 dessert la machine M4, le stock d'entrée INPUT et le stock de sortie OUTPUT.

Un convoyeur composé de tronçons indépendants (reliés par des jonctions et des aiguillages) assure la circulation des pièces entre les machines.

Aucun stock tampon n'est prévu entre les machines, le convoyeur servant de stock. Ainsi, chaque tronçon du convoyeur est susceptible de transporter ou stocker temporairement un certain nombre de pièces pour alimenter les machines.

Des capteurs sont placés aux points que nous avons définis au Chapitre 3, paragraphe 2.3.2.1 et comptent le nombre de pièces de chaque type fabriqué par les différentes machines à la fin de chaque horizon élémentaire de production.

Les pièces sont prises du stock d'entrée INPUT par le robot R4 et chargées sur le convoyeur J4X4.

Au début de l'exécution d'une gamme opératoire, le robot de la première machine de la gamme charge une pièce sur le buffer d'entrée de la machine ; celle-ci la place sur son buffer de sortie après usinage. Le robot reprend la pièce usinée du buffer de sortie de la machine pour la remettre sur le convoyeur qui va l'expédier vers la prochaine machine.

Après passage des pièces sur la dernière machine d'une gamme, elles sont placées par le robot R4 dans le stock de sortie OUTPUT.

2.1.2. Objectifs de la simulation

Le système de production, que nous avons simulé, a été modélisé pour répondre aux objectifs ci-dessous.

☛ En fonctionnement normal, il s'agit :

1. Optimiser le fonctionnement des machines afin de tendre vers un fonctionnement à charge maximale pour les machines menantes de chaque gamme.
2. Rechercher un fonctionnement en régime permanent cyclique par rapport aux pièces.
3. Appliquer la méthode de détection présentée au paragraphe 2.3 pour compter grâce aux capteurs placés aux positions que nous avons définies au paragraphe 2.3.2.1 le nombre de pièces fabriquées pendant des horizons élémentaires de production que nous définirons. Les flux de production puis les taux de dérive correspondants aux ensembles de ressources délimités par les capteurs seront ensuite calculés pour chaque type de produit.

➤ En fonctionnement dégradé, il s'agit de simuler des défaillances, et de noter leur effet sur l'évolution du flux. Pour cela, nous avons défini pour certaines ressources (machines, robots ou convoyeurs) des actions pour générer des défaillances. L'objectif final est de noter l'effet de ces défaillances sur le nombre de pièces produites, grâce aux mesures qui sont effectuées. Les données de la simulation en fonctionnement dégradé utilisées pour, dans le cadre de la détection, calculer les flux de production puis les taux de dérive correspondants à partir des résultats des mesures. Ces valeurs de taux de dérive sont ensuite utilisées par le programme de diagnostic implémenté sous Maple V (cf. Chapitre 3, paragraphes 2.3.3 et 2.4.1 et Annexe 6) pour retrouver la ressource défaillante.

2.1.3. Construction de la simulation

La simulation comporte deux phases. Les différentes étapes de chaque phase sont présentées sommairement ci-dessous. Les données relatives à chaque phase sont présentées dans le paragraphe 2.1.4.

La Phase 1 correspond à la simulation du fonctionnement normal du système, le comptage des pièces et le calcul des taux de dérive

La Phase 2 comprend la simulation du fonctionnement dégradé, et l'exploitation des données pour mettre en œuvre le diagnostic.

Nous donnons ci-dessous les étapes principales de chaque phase.

Phase 1

Le modèle de simulation de la Phase 1 a été défini en quatre étapes :

1. Définition de l'ensemble des ressources (machines, robots, convoyeurs, stocks) qui sont utilisées : leurs caractéristiques (type) et leurs différents paramètres (temps de cycle, etc.) ;
2. Spécification des différents produits à fabriquer : pour chaque type, on définit la quantité, le mode (lots) et la fréquence d'entrée dans le système ;
3. Définition du routage des pièces dans le système ;
4. Définition de lois d'utilisation des ressources pour la synchronisation des tâches ;
5. Définition de Lois pour : gérer l'acquisition des données, calculer les flux correspondant (à partir des mesures des capteurs), calculer les taux de dérive réels de chaque machine et de chaque étape à partir des flux correspondants.
5. Stockage des valeurs des taux de dérive et les dates d'acquisition correspondantes dans des fichiers qui seront traités sous Maple pour effectuer le diagnostic (cf. Annexe 6).

Phase 2

La Phase 2 consiste à compléter le modèle de simulation de la Phase 1 en intégrant l'acquisition des données. L'intégration de celle-ci passe par les étapes suivantes :

1. Spécification des capteurs utilisés : nombre, positions, types de pièces concernés par chaque capteur ;
2. Définition d'Actions permettant de gérer les dégradations de performance des ressources ;
3. Utilisation des données de la simulation pour mettre en œuvre le diagnostic.

2.1.4. Les données de la simulation

Nous présentons sommairement dans ce paragraphe les données de la simulation. Pour plus d'informations, se reporter à l'Annexe 2.

2.1.4.1. Données sur le processus physique

2.1.4.1.1. Données sur les moyens de production

On dispose de 5 machines M1, M2, M3, M4 et M5. M1, M3 et M5 sont mono-opérations : M1 (OM1,1), M3 (OM3,1), M5 (OM5,1). M2 et M4 sont multi-opérations : M2 (OM2,1 et OM2,2), M4 (OM4,1 et OM4,2).

Chacune de ces opérations ne peut être utilisée que pour fabriquer une pièce à la fois.

Le principal paramètre à prendre en compte dans la description des machines est le temps de cycle.

2.1.4.1.2. Données sur les moyens de transport

Les robots

Les paramètres à prendre en compte dans la description des robots sont les temps de transfert.

Les convoyeurs

On a utilisé des convoyeurs à accumulation ; c'est-à-dire que si la pièce de tête atteint l'avant du convoyeur sans pouvoir sortir, les pièces suivantes continuent à se déplacer et à s'accumuler les unes derrière les autres formant ainsi une file d'attente.

Les capacités des tronçons sont définies ainsi que leur temps de cycle.

Remarque :

Le choix d'utiliser des convoyeurs à accumulation nous permet de gérer l'accumulation de pièces. En fonctionnement normal, il y a un nombre de pièces constant en attente sur les convoyeurs. En cas de dérive, ce nombre augmente et tend à saturer certains convoyeurs.

2.1.4.1.3. Données sur les pièces à fabriquer

Les pièces P1, P2 et P3 sont fabriquées respectivement sur la base des gammes opératoires suivantes :

Pour une production de la gamme GO_1 seule, 200 pièces de type P1 sont fabriquées à la fin de chaque cycle ou horizon élémentaire de production (2200 secondes soit environ 37 minutes).

La production simultanée des trois gammes opératoires s'est faite suivant une production cyclique avec un horizon élémentaire $h = 8370$ secondes (environ 2 heures 20 minutes) à la fin duquel 270 pièces de chaque type sont fabriquées.

2.1.4.1.4. Données sur les stocks

On dispose de 2 stocks : un stock d'entrée et un stock de sortie. Leurs types et leurs capacités sont définies. Les modes d'entrée, de séjour et de sortie des pièces sont également spécifiés.

2.1.4.2. Données sur la conduite du système

2.1.4.2.1. Gestion des pièces

Le changement d'état des pièces est géré par des Actions (programmes) qui sont exécutées à la fin de chaque cycle machine.

Au départ, on a les pièces brutes P1, P2 et P3. Après leur passage sur les différentes machines spécifiées dans leur gamme opératoire, leur changement d'état est pris en compte. Ainsi :

P1 devient successivement	$P1_{2,}$	$P1_{21,}$	$P1_{213}$
P2 devient successivement	$P2_{4,}$	$P2_{42,}$	$P2_{421}$
P3 devient successivement	$P3_{1,}$	$P3_{15,}$	$P3_{154}$

2.1.4.2.2. Pilotage du système

Mode de conduite du système

Comme nous venons de le souligner, le mode de fonctionnement du système est cyclique (du point de vue des produits).

Entrée et sortie des pièces

La cadence d'entrée est donnée par la date du premier lancement (égal à 0) et le temps entre deux lancements (égal à 11 secondes pour une gamme, et de 31 secondes pour les trois gammes).

Pour la gamme opératoire P1, les pièces sont envoyées dans le système par lots de 1.

Pour les trois gammes opératoires, les trois types de pièces P1, P2 et P3 entrent dans le système par lots de trois pièces (une de chaque type) suivant la séquence P1 - P2 - P3.

Dans les deux cas, la sortie des pièces est privilégiée par rapport à l'entrée.

Routage des pièces

Des programmes appelés Lois d'Entrée/Sortie permettent de définir le routage des pièces dans le système suivant les gammes opératoires qui ont été définies (Figure 4.2).

Utilisation des machines par les différentes gammes

Il s'agit ici de gérer l'ordre et la durée d'affectation des machines aux différentes gammes. Il n'y a pas de préemption, comme nous l'avions énoncé dans nos hypothèses. Par conséquent, lorsqu'une machine commence l'usinage d'une pièce, elle doit le terminer avant d'en entamer une autre. La durée d'affectation d'une machine à une gamme est proportionnelle au temps de cycle de la machine et dépend du mode d'arrivée des pièces sur la machine. Cela signifie que si plusieurs pièces d'un type donné arrivent successivement sur la machine, celle-ci restera affectée à la gamme jusqu'à ce qu'un nouveau type de pièce arrive.

Utilisation des robots par les machines

La définition du partage des ressources R1 et R2 est simple. R1 et R2 sont disponibles à chaque demande de transfert par leurs machines respectives M1 et M2.

Par contre, le partage des robots R3 et R4 est géré par des Lois permettant de définir les priorités et la séquence d'utilisation par les machines et les stocks qui les partagent.

2.1.4.3. Données de l'acquisition

2.1.4.3.1. Définition des intervalles d'observation

Sur la base du mode de fonctionnement cyclique que nous avons défini, les intervalles d'observation correspondant aux horizons élémentaires de production sont les suivants :

- Dans le cas où seule la gamme GO_1 est produite, $h = 2200$ secondes (environ 37 minutes).
- Dans le cas où on produit les trois gammes GO_1 , GO_2 et GO_3 , $h = 8370$ secondes (environ 2 heures 20 minutes).

Le fonctionnement à régime permanent nous garantit en fonctionnement normal des taux de dérive nuls aux horizons élémentaires de production considérés.

2.1.4.3.2. Données sur les capteurs

Pour le comptage des pièces, nous disposons de cinq capteurs placés à coté de points $\{J2, J3, R3, X4, J4\}$. Le comptage des pièces par les différents capteurs se fait suivant le principe que

nous avons décrit au Chapitre 3, paragraphe 2.3.2.2. Il est géré par des Actions permettant d'identifier les différents types de pièces, et de compter une seule fois chaque pièce.

2.1.4.3.3. Données sur le flux de production et le taux de dérive

Sur la base des mesures effectuées par les différents capteurs, les flux de production ainsi que les taux de dérive de chaque machine et étape d'une gamme opératoire sont calculés à partir des équations (12) à (18) du Chapitre 3, paragraphe 2.3.3 (voir aussi la description du planning "horizon" en Annexe 2).

2.2. Résultats de la simulation

2.2.1. Résultats de la Phase 1

Le fonctionnement des machines, des robots et des convoyeurs du système a été optimisé et nous avons obtenu les résultats suivants :

- Pour la simulation de trois gammes opératoire GO_1 , GO_2 et GO_3 , les charges moyennes sont respectivement de 90%, 51% et 55% pour les machines, les robots et les convoyeurs.
- Dans le cas où la simulation a porté sur la gamme GO_1 seule, on a obtenu les charges moyennes suivantes : 91% pour les machines, 64% pour les robots et 82% pour les convoyeurs.

Les résultats de l'observation du système suivant les horizons élémentaires de production que nous avons définis précédemment nous ont permis de calculer les taux de dérive (cf. Annexe 2). Ceux-ci sont égaux à zéro en fonctionnement normal (ce qui confirme nos hypothèses) sauf sur le premier horizon élémentaire parce que le système est en phase de régime transitoire. Nous n'appliquons donc pas le diagnostic sur le premier horizon qui ne répond pas aux hypothèses énoncées au paragraphe 2.2 du Chapitre 3.

2.2.2. Résultats de la Phase 2

La Phase 2 correspond à la simulation du fonctionnement dégradé du système.

Le simulateur Witness n'offrant pas la possibilité d'introduire des "lois de défaillances" nous permettant de simuler des défaillances provoquant le ralentissement d'une machine, nous avons dû faire appel à des Actions qui modifient la valeur du temps de cycle d'une machine à partir d'une date donnée. Cette augmentation du temps de cycle correspond dans la réalité à une défaillance de la machine. C'est ce qui se passe par exemple lorsque pour atteindre une qualité égale, la machine prend plus de temps pour effectuer une opération d'usinage sur une pièce. Cette baisse de la qualité est par exemple due à une usure de l'outil. Un système d'auto-contrôle du niveau d'usure existant au niveau de la machine, le réajustement du temps de cycle se fait automatiquement afin de compenser le défaut de qualité (cf. Annexe 8), d'où le retard

retard accusé sur les opérations que devait effectuer la machine, et par conséquent la répercussion sur le flux (cf. Annexe 7).

Nous avons simulé trois types de défaillances sur la gamme opératoire GO₁ seule puis sur l'ensemble des trois gammes opératoires GO₁, GO₂ et GO₃ exécutées en même temps. Ceci dans le but de confirmer l'analyse que nous avons faite au Chapitre 3, paragraphe 2.6.

1. une défaillance sur la première machine d'une gamme,
2. une défaillance sur la seconde machine d'une gamme,
3. et enfin une défaillance sur la dernière machine d'une gamme,

2.2.2.1. Défaillances sur une seule gamme opératoire (Annexe 3)

La simulation d'une défaillance constante a porté sur les trois machines M1, M2 et M3 de la gamme opératoire GO₁ afin de vérifier l'effet du ralentissement d'une des trois machines sur le flux des autres machines selon leur position et leur vitesse.

Les machines M1, M2 et M3 ont toutes les trois un temps de cycle nominal (planifié) de 10.

Les résultats de la simulation en fonctionnement normal sont représentés à la Figure 4.3. Les valeurs correspondantes sont donnés en Annexe 3.A.

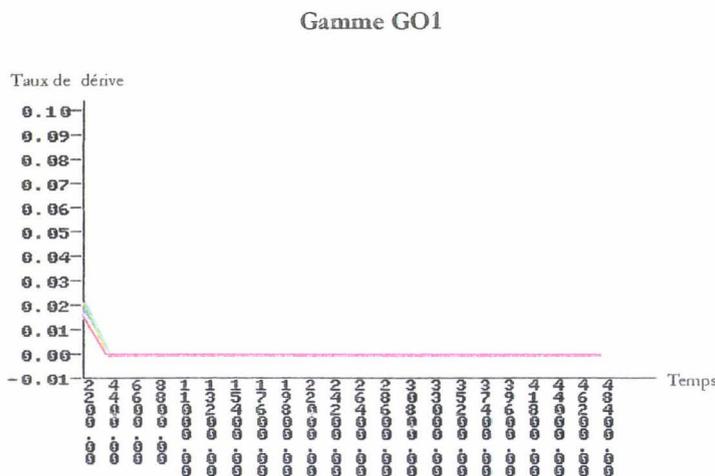


Figure 4-3 : Fonctionnement normal, Taux de dérive = f(temps) pour GO1

Remarque :

Nous avons noté pour tous les scénarios qui ont été simulés que :

- Le taux de dérive d'une machine "défaillante" est différent de zéro.
- Les taux de dérive des machines "perturbées" (c'est-à-dire qui subissent la dérive de la machine "défaillante") sont également différents de zéro, et sont égaux à une valeur minimale

(α_{I,X_i}^j , cf. Chapitre 3, paragraphe 2.4.2) lorsqu'elles sont situées en aval de la machine défaillante. Ceci nous permet de différencier une **dérive "propre"** d'une **dérive "induite"**.

2.2.2.1.1. M2 défaillante (Annexe 3.B, paragraphe 1)

Pour une augmentation du temps de cycle de la première machine (M2) de la gamme, on note les effets suivants : le taux de dérive de M2 devient non nul. Les machines M1 et M3 sont faiblement perturbées (Figure 4.4). Ceci est la conséquence d'une induction de gamme qui modifie la périodicité d'observation.

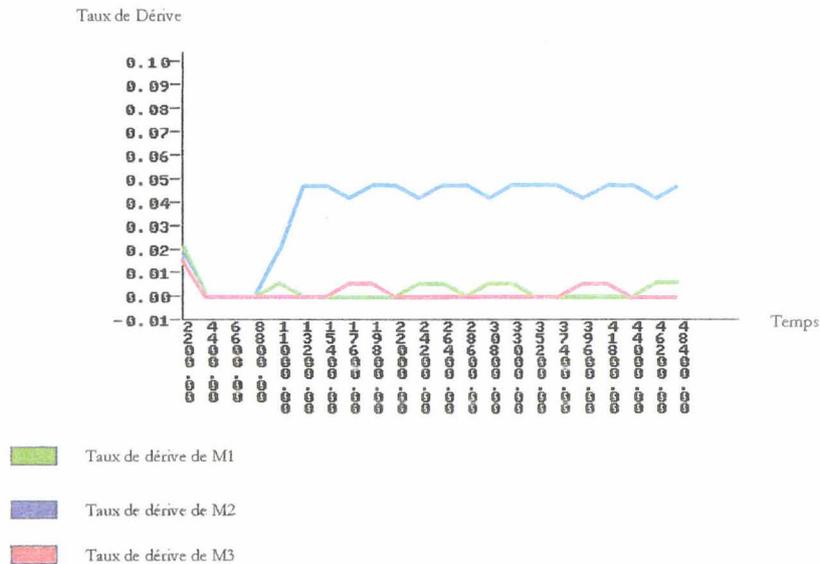


Figure 4-4 : Fonctionnement défaillant, Taux de dérive = f(temps) pour GO1

2.2.2.1.2. M1 défaillante (Annexe 3.B, paragraphe 2)

M1 représente la seconde machine de la gamme. Sa défaillance se traduit par un taux de dérive non nul. La machine amont M2 voit également son taux de dérive devenir non nul lorsque son convoyeur aval devient saturé. La machine M3 est faiblement perturbée. Nous avons donc la confirmation de la dérive induite par le système physique sur les machines amonts (Figure 4.5). On atteint ensuite un nouveau régime périodique, dans lequel la saturation du buffer d'entrée de la machine défaillante M2 fait que toute nouvelle entrée de pièces correspond à une sortie de pièce. On n'est plus capable de détecter les dysfonctionnements de cette machine.

La faible perturbation de M3 correspond à une induction de gamme.

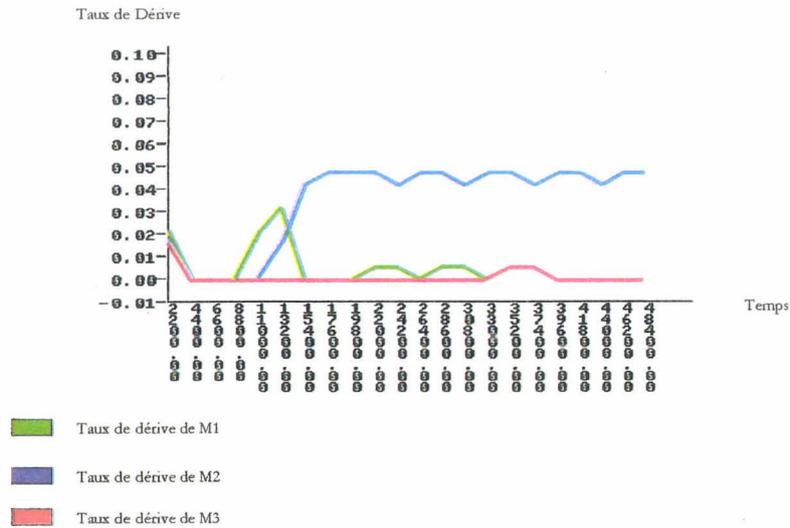


Figure 4-5 : Fonctionnement défaillant, Taux de dérive = f(temps) pour GO1

2.2.2.1.3. M3 défaillante (Annexe 3.B, paragraphe 3)

M3 représente la dernière machine de la gamme. Sa défaillance se traduit par un taux de dérive non nul. Sa dérive se répercute successivement sur la première machine amont M1 puis sur la deuxième M2 (Figure 4.6). Puis on atteint un nouveau régime périodique dans lequel on ne mesure plus que le taux de dérive induit de M2 (induction physique) et les taux de dérive induits de M1 et M3 dus au changement de périodicité.

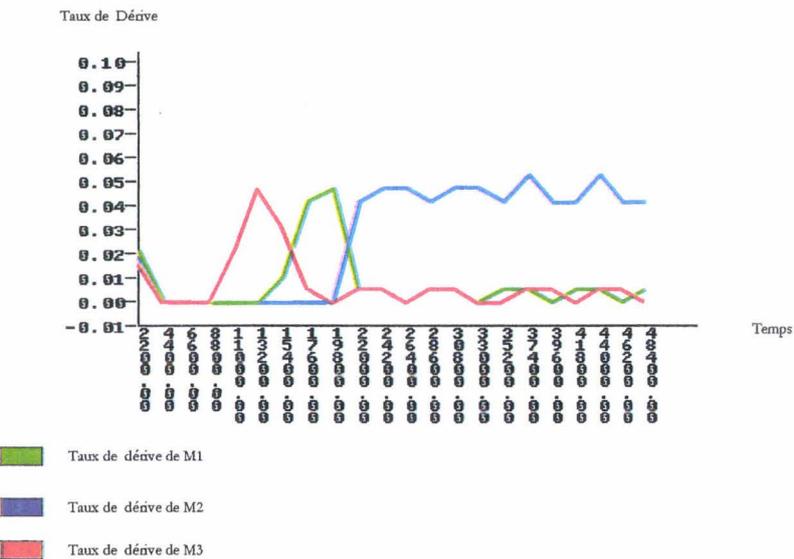


Figure 4-6 : Fonctionnement défaillant, Taux de dérive = f(temps) pour GO1

2.2.2.2. Défaillances sur les trois gammes opératoires (Annexe 4)

L'objectif des simulations des trois gammes opératoires GO₁, GO₂ et GO₃ est de vérifier ce que nous avons énoncé au Chapitre 3, paragraphe 2.4 quant à l'exploitation que nous pouvons faire de la redondance apportée par les flexibilités du système.

Rappel :

La gamme GO₁ utilise successivement les machines M2, M1 et M3 qui ont respectivement des temps de cycle de 15, 9 et 27 en fonctionnement normal.

La gamme GO₂ utilise successivement les machines M4 (O_{M4,1}), M2 (O_{M2,2}) et M1 qui ont respectivement des temps de cycle de 15, 15 et 9 en fonctionnement normal.

La gamme GO₃ utilise successivement les machines M1, M5 et M4 (O_{M4,1}) qui ont respectivement des temps de cycle de 9, 27 et 15 en fonctionnement normal.

Remarque :

Bien que nous ayons défini M2 et M4 comme des machines multi-opérations, propriété qui sera exploitée lors du diagnostic, nous avons dû les considérer comme des machines mono-opération dans le cadre de la simulation parce que Witness ne sait pas prendre en compte ce type de machine. Ainsi, seule une des deux opérations est considérée lorsqu'une gamme utilise les deux.

Les résultats de la simulation trois gammes opératoires en fonctionnement normal sont représentés sur les Figures 4.7 à 4.10; les valeurs correspondantes sont données en Annexe 4.A.

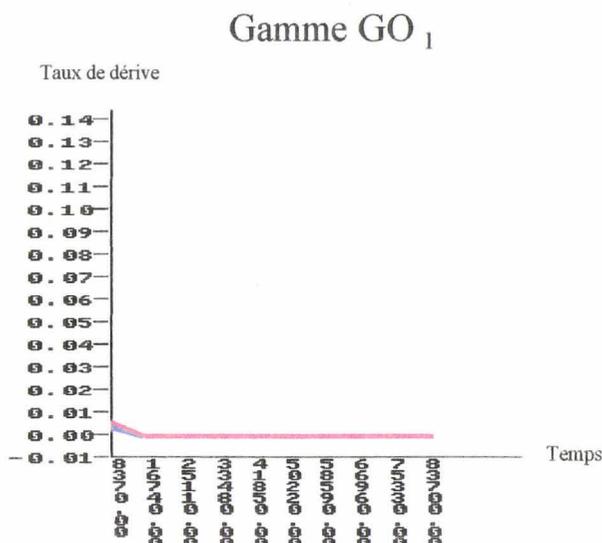


Figure 4-7 : Fonctionnement normal, Taux de dérive = f(temps) pour GO1

Gamme GO₂

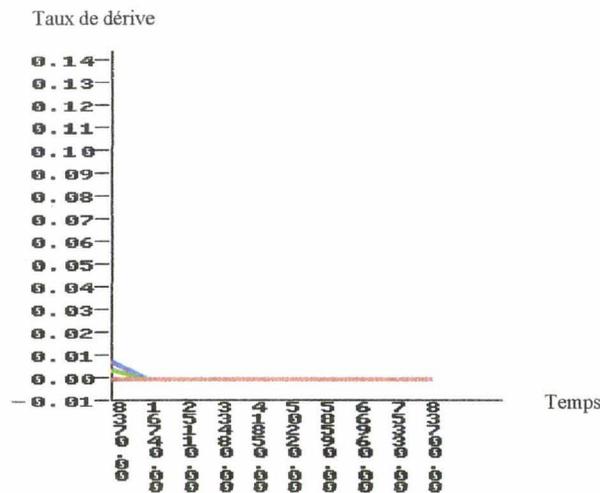


Figure 4-8 : Fonctionnement normal, Taux de dérive = $f(\text{temps})$ pour GO2

Gamme GO₃

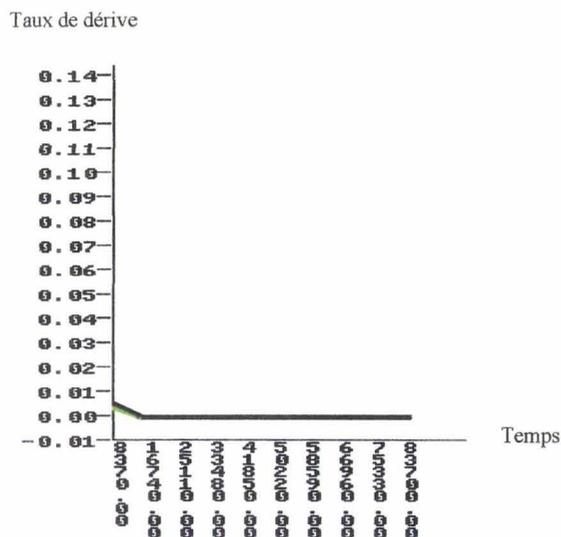


Figure 4-9 : Fonctionnement normal, Taux de dérive = $f(\text{temps})$ pour GO3

2.2.2.2.1. M2 défaillante (Annexe 4.B, paragraphe 1)

Nous voulons vérifier l'effet de la défaillance d'une machine sur les gammes qui ne l'utilisent pas. Ainsi, lorsque M2 est défaillante, nous avons noté les effets suivants sur les trois gammes :

- Sur la gamme GO₁ : M2 représente la première machine de la gamme. Sa dérive n'a qu'un faible effet sur les machines aval M1 et M3 (Figure 4.10), effet dû à une induction de gamme telle que nous l'avons expliqué précédemment.

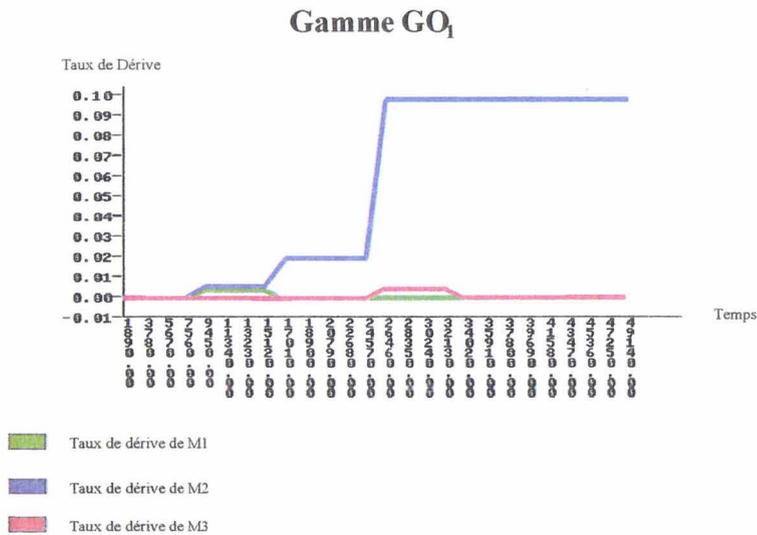


Figure 4-10 : Fonctionnement défaillant, Taux de dérive = f(temps) pour GO₁

- Sur la gamme GO₂ : la dérive de M2 qui représente la seconde machine de la gamme se répercute sur la machine amont M4 (induction physique) et sur la machine aval M1 par une induction de gamme (Figure 4.11).

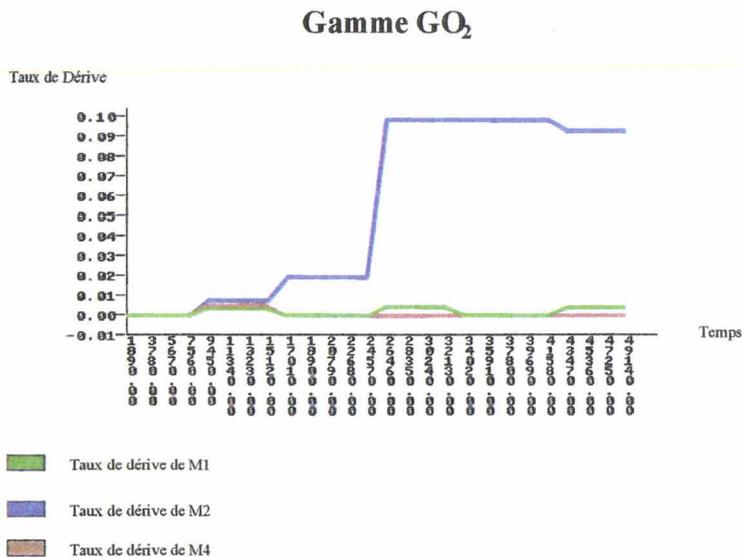


Figure 4-11 : Fonctionnement défaillant, Taux de dérive = f(temps) pour GO₂

- Sur la gamme GO₃ : bien que la machine M2 ne soit pas utilisée dans cette gamme, sa dérive provoque une perturbation sur les machines M1, M4 et M5 à cause du changement de périodicité alors que la fenêtre d'observation reste la même pour toutes la gammes (Figure 4.12).

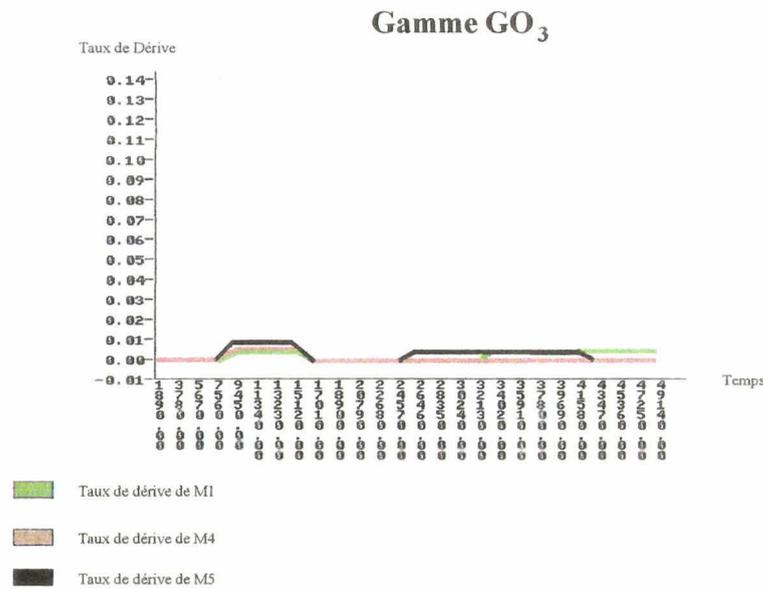


Figure 4-12 : Fonctionnement défaillant, Taux de dérive = f(temps) pour GO3

2.2.2.2.2. M1 défaillante (Annexe 4.B, paragraphe 2)

Lorsque l'on simule une défaillance de la machine M1 qui est utilisée dans les trois gammes opératoires, on note les effets suivants :

- Sur la gamme GO₁ : on observe le même phénomène que dans le cas décrit au paragraphe 2.2.2.1.2 ; La défaillance de la machine M1 qui représente la seconde se répercute sur la machine amont M2 par induction physique et sur la machine avale M3 par induction de gamme (Figure 4.13).

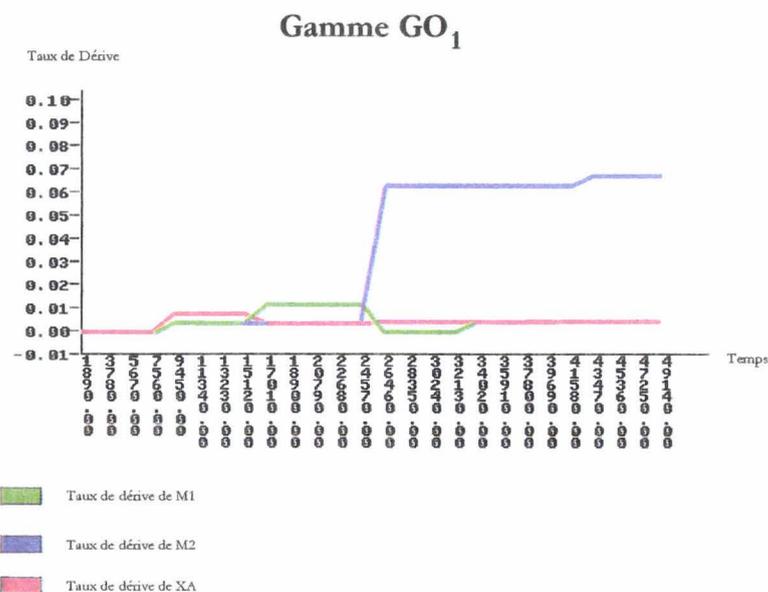


Figure 4-13 : Fonctionnement défaillant, Taux de dérive = f(temps) pour GO1

- Sur la gamme GO₂ : M1 représente la dernière machine de la gamme. Les machines amonts M2 et M4 sont successivement perturbées. Cela confirme bien le cas présenté au paragraphe 2.2.2.1.3 (Figure 4.14).

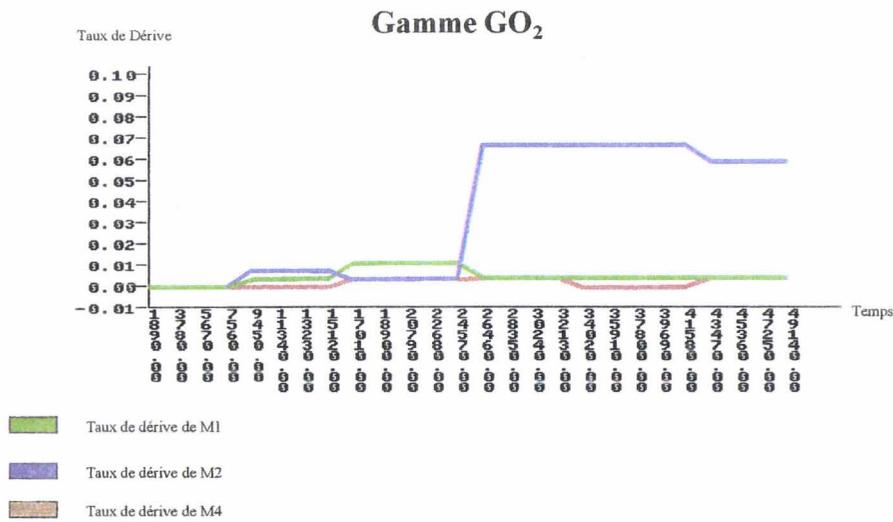


Figure 4-14 : Fonctionnement défaillant, Taux de dérive = f(temps) pour GO2

- Sur la gamme GO₃ : M1 représente la première machine de la gamme. Les machines avals M4 et M5 ne sont pas perturbées (Figure 4.15). C'est le même cas que celui de la machine M2 défaillante dans la gamme GO₁ (paragraphe 2.2.2.1.1).

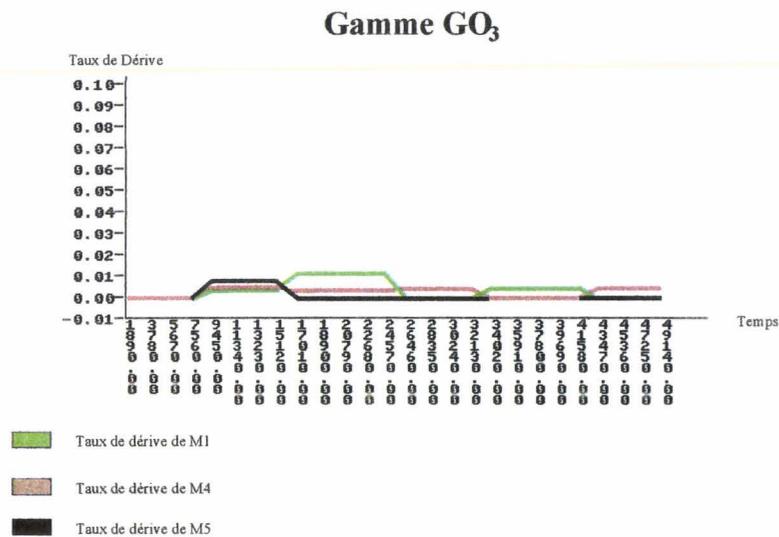


Figure 4-15 : Fonctionnement défaillant, Taux de dérive = f(temps) pour GO3

Cet exemple de défaillance sur une machine commune à plusieurs gammes permet de vérifier que l'effet de sa dérive sur les autres machines de la gamme dépend de la configuration physique du système. Nous constatons que les principes de propagation d'une dérive que nous avons énoncés pour une gamme restent valables pour plusieurs gammes.

2.2.2.3. Interprétation des résultats

Les résultats que nous avons obtenus lors de la simulation du fonctionnement dégradé du système ont confirmé nos hypothèses mais ont soulevé quelques limites.

Celles-ci se rapportent :

- A la perception d'une dérive. Les simulations que nous avons effectuées ont porté sur des machines fonctionnant au moins à 90% de leur temps. Ce qui leur laisse une marge de 10%. Par conséquent, une dérive par exemple de la machine M1 qui a un temps de cycle de 9 n'est perceptible que si son temps de cycle augmente au minimum de 10%.
- A la propagation d'une dérive dans une gamme. Cette propagation dépend de la vitesse des machines les unes par rapport aux autres. Si la dérive se produit sur la machine la plus lente de la gamme alors que c'est elle qui impose son rythme de fonctionnement aux autres machines, l'effet sur celles-ci est simplement perçu par une baisse de leur flux et une accumulation de pièces sur les convoyeurs.
- A la valeur des taux de dérive. Lorsqu'une machine ralentit, on distingue deux sortes de taux de dérive : un taux de dérive "propre" qui est celui de la machine défaillante et un taux de dérive "induit" qui est celui des autres machines "perturbées". La propagation de la dérive se faisant de manière progressive, on note que la valeur du taux de dérive induit varie en fonction de la position de la machine. En aval de l'ensemble de ressources défaillant d'une gamme, ce taux de dérive est minimal (cf. Chapitre 3, paragraphe 2.4.2). En amont du même ensemble de ressources, il peut être supérieur au taux de dérive de celui-ci. En fait, sa valeur dépend de la capacité des buffers situés entre les deux machines de l'ensemble de ressources défaillant et de celui perturbé. Ce fait vient compliquer le diagnostic dans la mesure où il ne permet pas de juger de l'état réel de l'ensemble de ressources perturbé, à savoir s'il est effectivement perturbé ou défaillant.
- La dernière difficulté à prendre en compte est l'évolution du système face à une dérive. En effet, lorsqu'une dérive apparaît, les taux de dérive sont modifiés pendant un certain temps, puis le système entre dans un nouveau régime permanent parce que certains convoyeurs sont entrés en saturation. D'où l'importance de la réactivité. Il faut détecter la dérive avant la saturation des buffers.

2.3. Exploitation des résultats de la simulation

2.3.1. Le Diagnostic

☛ Ce qu'il faut retenir

La simulation a confirmé qu'il fallait tenir compte des données suivantes pour mettre en œuvre la procédure de diagnostic :

1. En fonctionnement normal, le taux de dérive est nul aux périodes d'observation considérées.
2. Lorsqu'une dérive se produit, le taux de dérive de l'ensemble de ressources défaillant est le premier à être modifié, puis celui des autres ensembles de ressources perturbés est modifié.
3. Le taux de dérive des ensembles de ressources perturbés est égal à une valeur minimale lorsque ceux-ci sont situés en aval de l'ensemble défaillant et appartiennent à la même gamme (cf. Chapitre 3, paragraphe 2.4.2).
4. L'identification de la (ou des) ressource(s) défaillante(s) doit se faire avant que le système n'entre dans un nouveau régime permanent.

Résultats du diagnostic (Annexe 6)

L'algorithme de diagnostic implémenté sous Maple V effectue les opérations suivantes :

- Lecture des fichiers de données de chaque gamme opératoire pour le fonctionnement dégradé. Chaque fichier contient le temps et les taux de dérives propres des ensembles de ressources et les taux de dérives réels des étapes de chaque gamme opératoire. Rappelons que les données relatives aux périodes transitoires ne sont pas prises en compte.
- Recherche des ressources défaillantes au temps considéré, en appliquant les règles que nous avons établies au Chapitre 3, paragraphe 2.4.3.

Les résultats du diagnostic donnés en Annexe 6 correspondent à la simulation des trois gammes opératoires GO_1 , GO_2 , GO_3 , avec des défaillances sur les machines M1 et M2. On retrouve bien les ressources dont le temps de cycle avait été allongé dans la simulation, ce qui confirme bien nos hypothèses et qui nous permet de tirer les conclusions suivantes :

1. Lorsqu'une ressource est défaillante, sa dérive se propage physiquement aux autres ressources situées en amont.
2. Une défaillance se traduit de la même manière sur toutes les gammes utilisant la ressource (ou l'opération) défaillante. Les gammes qui n'utilisent pas la ressource (ou l'opération) ne sont que peu perturbées.
3. La propagation de la dérive a lieu pendant un intervalle de temps donné, puis le système entre dans un nouveau régime de fonctionnement. Par conséquent, le diagnostic doit se faire dans cette période afin d'identifier la ressource qui est à l'origine de la dérive.

2.3.2. Le Pronostic

L'application du pronostic au système simulé permet d'évaluer de manière quantitative et temporelle l'effet d'une dérive sur celui-ci.

Soient les ressources de la gamme GO_1 (Figure 4.2) ayant les caractéristiques nominales suivantes (cf. Annexe 2) :

	TEMPS DE CYCLE	CAPACITÉ DES CONVOYEURS
M1	10	-
M2	10	-
M3	10	-
R1	3.5	-
R2	3.5	-
R3	3.5	-
R4	1.65	-
J4X4	3	3
X4A2	1.5	7
A2X2	0.71	10
X2J3	0.9	10
J3X1	1	10
X1J2	1	10
J2A1	1	10
A1X3	1	10

Tableau 4.1 : Valeurs nominales des ressources participant à la fabrication de GO_1

La simulation du fonctionnement du système de production s'est faite en considérant deux cas :

- Le fonctionnement normal : les machines ont un temps de cycle nominal de 10.
- Et le fonctionnement dégradé.

Afin de comparer les résultats théoriques donnés par les équations que nous avons établi au Chapitre 3, paragraphe 2.5 avec les résultats pratiques de la simulation, nous avons introduit une défaillance sur la machine M1 de la gamme opératoire GO_1 . Nous avons ainsi calculé et vérifié :

1. Le nombre de pièces présentes sur les convoyeurs utilisés par la gamme à des intervalles de temps constants de 15 minutes connaissant les flux entrant et sortant. Du fait du nombre réduit de points de mesures que nous avons définis, nous n'avons pas pu obtenir par les valeurs des flux entrant et sortant de chaque tronçon. Ainsi, seul le nombre de pièces présentes sur des ensembles de convoyeurs, machine et robot ont pu être calculés et les valeurs obtenues comparées à la somme des valeurs données par le simulateur Witness pour chaque convoyeur. Par exemple, le nombre de pièces calculé sur les tronçons J3X1 et X1J2, la machine M1 et le robot R1 sera comparé à la somme des nombres de pièces présentes sur les deux convoyeurs, la machine et le robot (Tableau 4.2).
2. La date de saturation des convoyeurs en connaissant leur capacité et leurs flux (Tableau 4.3).

3. Le retard sur la production causé par le ralentissement de la machine M1. Ce retard est exprimé en terme de pourcentage du nombre de pièces fabriqué par rapport au nombre de pièces qui aurait du l'être si la machine M1 fonctionnait normalement (Tableau 4.3).

Pour une cadence d'entrée dans le système d'une pièce toutes les 11 secondes et sur une durée globale de production de 5 heures et une défaillance sur M1 qui voit son temps de cycle passer de 10 à 12, les résultats sont donnés dans les Tableaux 4.2 et 4.3 ci-dessous.

CAPACITE DU SOUS-ENSEMBLE	NOMBRE DE PIECES CALCULE	NOMBRE DE PIECES DONNE PAR LA SIMULATION
A t = 15min		
$U_{\substack{A2X2 \\ X2J3}}$	3	1 sur A2X2 1 sur X2J3 1 sur M2 0 sur R2 <hr/> 3 Total
$U_{\substack{J3X1 \\ X1J2}}$	11	8 sur J3X1 1 sur X1J2 1 sur M1 1 sur R1 <hr/> 11 Total
$U_{\substack{J2A1 \\ A1X3 \\ X3A4}}$	4	1 sur J2A1 1 sur A1X3 1 sur X3A4 1 sur M3 0 sur R3 <hr/> 4 Total

A t = 30min		
$U_{\substack{A2X2 \\ X2J3}}$	7	1 sur A2X2 4 sur X2J3 1 sur M2 1 sur R2 <hr style="width: 50px; margin-left: 0;"/> 7 Total
$U_{\substack{J3X1 \\ X1J2}}$	14	10 sur J3X1 1 sur X1J2 1 sur M1 1 sur R1 <hr style="width: 50px; margin-left: 0;"/> 13 Total
$U_{\substack{J2A1 \\ A1X3 \\ X3A4}}$	4	1 sur J2A1 1 sur A1X3 1 sur X3A4 1 sur M3 0 sur R3 <hr style="width: 50px; margin-left: 0;"/> 4 Total

A t = 45min		
$U_{\substack{A2X2 \\ X2J3}}$	14	2 sur A2X2 10 sur X2J3 0 sur M2 1 sur R2 <hr style="width: 50px; margin-left: 0;"/> 13 Total
$U_{\substack{J3X1 \\ X1J2}}$	14	10 sur J3X1 1 sur X1J2 1 sur M1 1 sur R1 <hr style="width: 50px; margin-left: 0;"/> 13 Total
$U_{\substack{J2A1 \\ A1X3 \\ X3A4}}$	4	1 sur J2A1 1 sur A1X3 1 sur X3A4 1 sur M3 0 sur R3 <hr style="width: 50px; margin-left: 0;"/> 4 Total

Tableau 4.2 : Nombre de pièces présentes sur les convoyeurs

Convoyeurs	J3X1	X2J3	A2X2	X4A2	J4X4
Date de saturation	19min	40min	1h05min	1h11min	1h17min
Retard de production	8.5%				

Tableau 4.3 : Date de saturation des convoyeurs et Retard de production

Le pourcentage obtenu concernant le retard de production signifie que pour une production d'environ 3270 pièces sur 5 heures, il y a un manque à gagner pouvant aller jusqu'à 280 pièces toutes les 5 heures. Cela représente un coût non négligeable quand on sait que ce coût ne représente pas seulement le manque à gagner sur le chiffre d'affaire que l'entreprise aurait pu réaliser si le plan de production avait été respecté. Il y a d'autres facteurs à considérer tels que : les risques de perte des clients si les délais ne sont pas respectés, des coûts de stockage supplémentaires si l'on veut disposer d'un stock permettant de palier à ces retards, le coût de finition des pièces accumulées dans le système (c'est le cas lorsque ce retard provient d'une baisse de la qualité), etc.

Nous établissons dans le paragraphe 4 un certain nombre d'indicateurs de performances permettant d'exploiter les résultats de la Surveillance Prédictive Indirecte. Nous présentons auparavant (paragraphe 3) une méthode analytique permettant de corriger les valeurs de taux de dérive données par la Détection.

Les conséquences d'une baisse de performances des ressources concernant un retard de production ne se limitent pas seulement au secteur de la Production. La Maintenance est également concernée. En effet, en ayant des informations sous-estimées sur la gravité d'une défaillance, la Maintenance va définir des actions d'intervention tardives qui auront pour conséquence de laisser une défaillance s'aggraver et d'augmenter les coûts d'intervention. C'est le cas par exemple lorsqu'au lieu d'arrêter une machine pour un entretien préventif, on la laisse fonctionner jusqu'à sa défaillance complète, ce qui implique alors une maintenance corrective plus coûteuse.

3. PRISE EN COMPTE DES MARGES LORS DE LA DETECTION D'UNE DERIVE DE FLUX

Le principal handicap de l'approche quantitative est que l'efficacité de la détection dépend des marges existantes sur les machines ; c'est-à-dire que leur charge de fonctionnement ne représente pas 100% de leur temps de disponibilité considéré sur un cycle de production. Le temps de disponibilité d'une machine représente le temps pendant lequel la machine est prête à produire.

La **charge d'une machine** représente la somme des temps opératoires des opérations qu'elle doit effectuer. Elle est inférieure ou égale au temps de disponibilité de la machine sur le cycle de production

Lorsque des marges existent au niveau des machines, la dérive qu'elles peuvent subir est masquée tant que le retard sur les opérations qu'elles effectuent peut être rattrapé en consommant leur marge.

Lorsque des marges existent au niveau des machines, la dérive qu'elles peuvent subir est masquée tant que le retard sur les opérations qu'elles effectuent peut être rattrapé en consommant leur marge.

Lorsque la marge est consommée et que la dérive devient détectable, elle reste cependant sous-évaluée. En effet, le taux de dérive calculé n'exprime pas l'état réel de la défaillance de la machine. Le taux de dérive serait plus important si la machine ne possédait pas de marge. D'un point de vue Production, la marge constitue un apport bénéfique étant donné qu'elle permet de fabriquer un nombre plus important de pièces. Par contre, d'un point de vue Maintenance, elle empêche d'évaluer le niveau de défaillance réel de la machine. Cela pose un problème quand on sait que la "surexploitation" d'une machine défaillante peut aggraver son état et entraîner une propagation de la défaillance et des coûts de maintenance plus importants. L'objectif de la Maintenance est en effet d'intervenir au bon moment en minimisant ces coûts.

Nous proposons dans ce paragraphe une méthode analytique permettant de prendre en compte les marges des machines lors de la détection, afin de corriger les valeurs des taux de dérive obtenues. Avant de présenter la méthode, nous introduisons les notions de **Marge de machine** et de **Marge de gamme** du point de vue des différentes approches d'ordonnement que nous avons définies au Chapitre 2, paragraphe 3.1.1 afin de voir comment elles sont abordées par chacune d'elles.

3.1. Notions de marges du point de vue de l'approche cyclique

Connaissant les ratios de production (nombre de pièces de chaque type à produire simultanément) et la charge affectée à chaque machine, l'ordonnement cyclique [Korbaa 98] cherche par le biais d'une production répétitive sur un horizon limité à obtenir le meilleur compromis entre quatre principaux critères :

1. Le temps minimal total de production (makespan). Il équivaut à la durée du cycle. Une approche équivalente consiste à maximiser le flux de production.
2. L'en-cours minimal : c'est le nombre de palettes autorisées à circuler dans le système au cours d'un cycle de production.
3. La taille minimale de l'horizon cyclique.
4. La durée minimale des cycles pour garantir un flux maximal et donc imposer la saturation des machines les plus lentes du système.

Ce dernier critère montre bien que l'existence de marges au niveau des machines n'est pas un objectif de l'ordonnement cyclique. Elle est un fait qui découle de la répartition des opérations de chaque gamme sur les différentes machines concernées. Le critère n°2 imposant aux pièces d'avoir des temps d'attente les plus faibles possibles entre deux opérations, les opérations doivent être ordonnées de telle sorte que ni les machines, ni les pièces ne

subissent des attentes inutiles. Ainsi, l'existence d'un temps d'attente au niveau d'une machine signifie une perte de temps sur l'horizon de production lorsqu'il est inférieur au plus petit temps opératoire que la machine pourrait effectuer.

Dans l'approche cyclique, la **marge d'une machine** sur un cycle de production est définie ainsi :

$$0 \leq m = CT - \sum Top \leq CT \quad (39)$$

CT représente la durée d'un cycle

Top représente les temps opératoires des différentes opérations effectuées par la machine durant ce cycle.

La valeur de la marge des machines permet de déterminer si l'ordonnancement effectué répond aux critères fixés au départ.

Ainsi, lorsque initialement $m = 0$, cela signifie que l'ordonnancement est critique (du point de vue de la machine) ce qui implique sa remise en cause à la moindre perturbation dans le système.

Si elle devient négative, cela signifie que toutes les opérations de la machine n'ont pu être placées dans un cycle et que par conséquent l'ordonnancement en cours n'est pas admissible.

Quant à la **marge de gamme**, elle est définie au début de l'ordonnancement par :

$$0 \leq M = \text{nombre d'en-cours évalué} * CT - \text{somme des temps opératoires} \leq CT \quad (40)$$

Le nombre d'en-cours évalué correspond au nombre de palettes circulant à l'intérieur du système.

3.2. Notions de marges du point de vue de l'approche réactive

Dans l'approche réactive de [Roubellat 88], [Artigues 97], la notion de marge est définie par rapport à des groupes d'opérations (cf. Chapitre 2, paragraphe 3.1.1.2). Les opérations d'un même groupe étant non séquencées (c'est-à-dire qu'elles peuvent être exécutées dans n'importe quel ordre), on distingue deux types de marges associées à une opération d'exécution $O_{i,j}$, à l'intérieur d'un groupe G , à un instant t :

- La **marge propre** $mop(O_{i,j}, t)$: elle met uniquement en jeu la date de début au plus tôt réactualisée $r_{O_{i,j}}(t)$, et la date de fin au plus tard $D_{O_{i,j}}$ calculée pour respecter l'admissibilité à la fin de la procédure de génération de la séquence.

$$mop(O_{i,j}, t) = D_{O_{i,j}} - p_{O_{i,j}} - r_{O_{i,j}}(t) \quad (41)$$

$p_{O_{i,j}}$ représente la durée d'une opération.

- La **marge de groupe** $mg(O_{i,j},t)$: elle prend en compte les autres opérations du groupe (si elles existent) en considérant les permutations les plus défavorables pour lesquelles $O_{i,j}$ est exécutée en premier.

$$mg(O_{i,j},t) = \min_{O_{u,v} \in G, O_{u,v} \neq O_{i,j}} D_{O_{u,v}} - \sum_{O_{u,v} \in G} p_{O_{u,v}} - r_{O_{i,j}}(t) \quad (42)$$

Cette marge de groupe n'existe que si G contient au moins deux opérations.

A partir de ces deux marges, on définit la **marge libre séquentielle** $ml(O_{i,j},t)$ [Thomas 80] comme leur minimum :

$$ml(O_{i,j},t) = \min\{mop(O_{i,j},t), mg(O_{i,j},t)\} \quad (43)$$

La notion de séquence de groupe rappelle celle de gamme opératoire dans l'ordonnement cyclique. La marge de gamme telle qu'elle est définie dans l'approche cyclique est cependant différente de la marge de groupe que nous venons de définir. Elle est plutôt équivalente à la marge de séquence définie dans l'approche dynamique (cf. paragraphe ci-dessous).

3.3. Notions de marges du point de vue de l'approche dynamique

L'approche dynamique [Tawegoum 95] se base sur un ordonnancement prévisionnel (effectué hors ligne) pour gérer les perturbations qui interviennent en cours de production afin de maintenir l'ordonnement initial. Pour cela, elle exploite la notion de marge de machine suivant deux approches basées sur les notions de **marge opératoire** et de **marge de séquence**.

La **marge opératoire** considère individuellement les opérations. Considérant une opération $O_{M_i}^j$ d'un produit j à réaliser sur une machine M_i , et une date de début $t_{M_i}^j$ d'exécution de cette opération, la marge opératoire se définit comme la différence entre la date de fin prévisionnelle $D_{M_i}^j$ et la date de fin estimée $d_{M_i}^j$.

$$m_{M_i}^j = D_{M_i}^j - d_{M_i}^j \quad (44)$$

Deux cas peuvent se produire :

- Si $m_{M_i}^j \geq 0$ les délais internes (locaux) sont respectés ;
- Si $m_{M_i}^j < 0$, le délai local interne n'est pas respecté, ce qui a une conséquence sur les autres opérations ou produits liés par l'utilisation de la même machine à l'intérieur d'une même séquence d'opération (cf. Chapitre 2, paragraphe 3.1.1.3).

Au vu de ce problème, l'objectif du pilotage dynamique est d'éliminer la perturbation en exploitant la flexibilité des gammes ou la marge opératoire de certains produits appartenant à une même séquence d'opération.

La **marge de séquence** quant à elle concerne l'ensemble des produits d'une séquence d'opérations effectuée sur une même machine. Il représente la plus petite marge opératoire de la séquence.

$$mseq = \min[m_{M_i}^j] \quad (45)$$

La marge de séquence permet de savoir si la séquence commençant par l'opération candidate est exécutable sans qu'une opération de la séquence ne soit en retard.

- Si $mseq \geq 0$ cela signifie que même si un retard se produit sur la première opération, elle est absorbée grâce à la marge opératoire, et les dates de fin au plus tard des autres opérations sont respectées. C'est le phénomène d'absorption de la dérive que nous avons évoqué précédemment.
- Si $mseq < 0$, cela signifie que sans actions de corrections de la part du système de pilotage, les dates de fin des opérations exécutées sur la machine à partir du début de la perturbation ne sont pas respectées. C'est le phénomène de propagation de la dérive que nous avons évoqué dans les paragraphes précédents.

Pour dégager une idée générale de la notion de marges, nous pouvons dire qu'elles permettent d'évaluer la capacité d'un système à exécuter l'ordonnancement établi. Ainsi par exemple, dans le cas de l'ordonnancement cyclique, bien que les marges obtenues au niveau des machines n'aient pas été un objectif en soi, elles représentent un moyen de gérer les perturbations qui peuvent intervenir en cours de production. On peut s'en servir pour éliminer en temps réel une perturbation (approches réactive et dynamique) ou a posteriori pour obtenir un certain degré de "tolérance" du système face à certaines perturbations c'est-à-dire que même en cas de dérive, les ratios de production peuvent être respectés dans une certaine mesure. Dans les deux cas, il est important de connaître l'ampleur réelle d'une défaillance en évaluant son impact réel sur le flux de production.

3.4. Prise en compte des marges dans la détection

Notations

Soient :

- O_{M_i} une opération à effectuer sur la machine M_i
- T_{P,M_i} le temps de cycle planifié (théorique) de la machine M_i
- T_{R,M_i} le temps de cycle réel de la machine M_i ou durée d'exécution de l'opération O_{M_i}
- r_{M_i} la date de début au plus tôt de l'opération O_{M_i}
- t_{M_i} la date de début d'exécution de l'opération O_{M_i}

d_{M_i} la date de fin d'exécution de l'opération O_{M_i}

D_{M_i} la date de fin au plus tard de l'opération O_{M_i}

$mp_{M_i} = D_{M_i} - d_{M_i}$ la marge planifiée de la machine M_i

La Figure 4.16 représente les différents paramètres d'une opération.

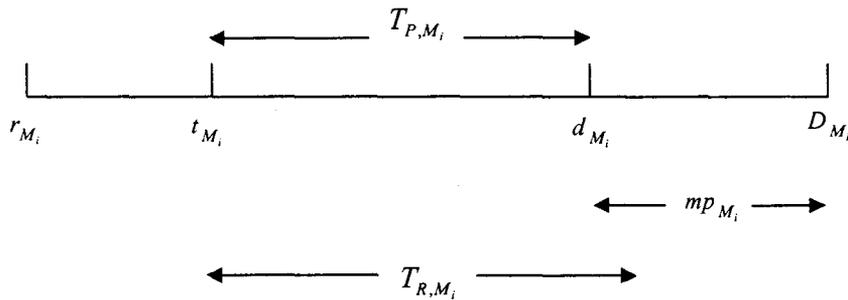


Figure 4-16 : Paramètres d'une opération

NB : Cette configuration est aussi valable pour les ressources de transfert.

Si la machine doit exécuter plusieurs opérations sur différentes gammes, sur un cycle de production, on a deux possibilités :

- Soit la machine M_i est la machine menante du système, dans ce cas $mp_{M_i} = 0$.
- Soit la machine M_i n'est pas la machine menante du système et on a $mp_{M_i} \neq 0$.

Ces deux cas sont illustrés sur la Figure 4.17 ci-dessous.

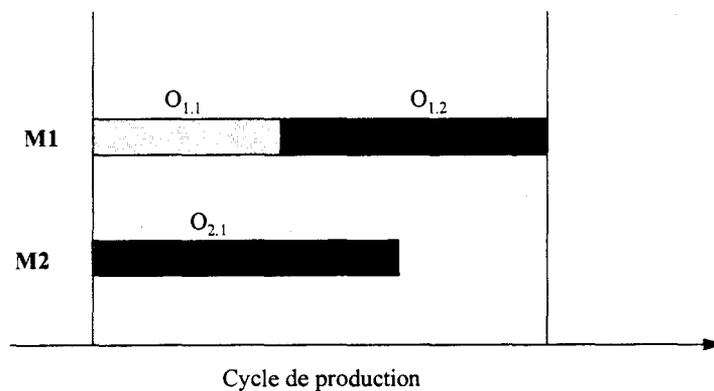


Figure 4-17 : Les deux types de machines existant dans un système de production.

A partir de ces deux situations que nous venons d'illustrer, nous pouvons énoncer la définition suivante :

Définition :

Le **coefficient d'absorption propre (cap) d'une ressource** est le rapport entre la marge planifiée et le temps de cycle planifié de la ressource. Il définit la capacité de la ressource à assurer une opération malgré son début tardif.

Dans le cas d'une machine, il s'écrit :

$$cap_{M_i} = \frac{mp_{M_i}}{T_{P,M_i}} \quad (45)$$

Les valeurs de mp_{M_i} et de T_{P,M_i} sont connues, ce qui permet de calculer le coefficient d'absorption propre.

Le coefficient d'absorption propre a des significations différentes selon que la machine participe ou pas à une gamme. En effet, si $cap_{M_i} = 0$, et que la machine ne participe pas à la gamme, l'effet de sa dérive sur celle-ci est propagé indirectement par l'intermédiaire des ressources de transfert.

Par contre, si la machine participe à la gamme, l'effet de sa dérive sur celle-ci dépend de sa marge et de celle des autres machines de la gamme, en particulier la plus lente de la gamme. Ceci nous amène à définir la notion de Marge de gamme.

Soient :

Mp^j la marge totale planifiée de la gamme GO_j

T_p^j Temps d'exécution total planifié des opérations de la gamme GO_j .

On a :

$$T_p^j = \sum_{M_i \in GO_j} T_{P,M_i}^j \quad (46)$$

$$Mp^j = \min_{M_i \in GO_j} mp_{M_i} \quad (47)$$

Définition :

Le **coefficient d'absorption propre d'une gamme** est le rapport entre la marge totale planifiée et le temps d'exécution total planifié. Il exprime donc la capacité des ressources de la gamme à assurer des opérations tardives sur l'horizon élémentaire de production considéré. Il s'écrit :

$$cap_{GO_j} = \frac{Mp^j}{T_p^j} \quad (48)$$

Problématique

On veut fabriquer N_p pièces de type j pendant T_p . Si la gamme opératoire GO_j ne possède pas de marge, on fabriquera N_R en présence d'une dérive. Le nombre de pièces manquantes serait alors $N_p - N_R$.

Le taux de dérive est :

$$\alpha_{GO_j}(h_k) = \frac{\Delta N_E^j(h_k)}{\Delta N_S^j(h_k)} - 1 = \frac{\Delta N_P^j(h_k)}{\Delta N_R^j(h_k)} - 1 \quad (49)$$

Mais en présence de marges, le nombre de pièces réellement fabriquées est :

$$N'_R = N_R(1 + cap_{GO_j}) \quad (50)$$

d'où un taux de dérive qui s'écrit de la manière suivante :

$$\alpha'_{GO_j}(h_k) = \frac{\Delta N_P^j(h_k)}{(1 + cap_{GO_j})\Delta N_R^j(h_k)} - 1 \quad (51)$$

Les équations (49) et (51) donnent :

$$\alpha_{GO_j} = (\alpha'_{GO_j} + 1)(1 + cap_{GO_j}) - 1 \quad (52)$$

L'équation (52) exprime le taux de dérive d'une gamme sans marges. On voit bien qu'il est supérieur au taux de drive calculé en présence de marges.

Ce résultat est bien sûr applicable à une ressource prise individuellement, et permet de "corriger" les valeurs de taux de dérive obtenues lors de la détection.

4. EXPLOITATION DES RESULTATS DE LA SURVEILLANCE PREDICTIVE INDIRECTE

4.1. Indicateurs de performances

Un indicateur est "une donnée exprimée en quantité et non en valeur qui mesure l'efficacité de tout ou partie d'un processus ou d'un système par rapport à une norme, un plan ou un objectif qui aura été déterminé et accepté dans le cadre d'une stratégie d'ensemble" [Bonnefous 93].

Afin de montrer l'intérêt de la Surveillance Prédictive Indirecte pour les SFPM, nous proposons dans ce paragraphe quelques indicateurs permettant d'évaluer a posteriori la politique de maintenance mise en œuvre en quantifiant les performances du système. Ils représentent un outil d'aide à la décision sur les actions à mener par la Maintenance et la Production suite à une dérive. La première action vise à améliorer les performances et la Sûreté de Fonctionnement du système et la seconde permet d'aider à la définition de choix de conduite qui optimiserait l'exploitation du système. Signalons que ces indicateurs ne sont pas ceux couramment utilisés dans le cadre de l'analyse des performances et de la sûreté de

fonctionnement des systèmes [Bonnefous 93], [Sassine 98]. Nous les avons définis dans le cadre de notre approche de Surveillance Prédicative Indirecte.

Notre objectif est, rappelons le, d'établir une politique optimale de Maintenance qui soit la plus proche possible de la Production. Notre démarche consiste à suivre et évaluer les performances du système puis, à partir des résultats obtenus, à décider des actions de maintenance à mener pour améliorer les performances et le niveau de sûreté de fonctionnement du système.

L'analyse que nous proposons ici constitue l'étape d'évaluation des performances du système. Elle s'appuie sur les objectifs de production exprimés sous forme de **données de production** et sur les résultats de la Surveillance Prédicative Indirecte pour quantifier les dysfonctionnements du système.

Nous distinguons deux types d'indicateurs de performances : les **indicateurs de résultat** et les **indicateurs de processus** [Sassine 98].

Les indicateurs de résultat expriment les résultats de la Production sur le plan quantitatif, qualitatif, temporel (délais).

Les indicateurs de processus expriment la façon dont les résultats de la Production ont été obtenus.

4.1.1. Les données de production

Avant de définir les indicateurs de performance, nous donnons dans ce paragraphe l'ensemble des données de production qui permettent d'exprimer les objectifs de production d'un point de vue quantitatif, qualitatif, temporel et du coût.

Nombre de pièces brutes : c'est le nombre total de pièces à produire dans les conditions de fonctionnement définies.

Nombres d'arrêts prévus pour maintenance préventive : c'est le nombre de fois qu'une ressource du système devra être arrêtée pour subir des actions de maintenance préventive.

Taux de charge planifié des machines : c'est le pourcentage de temps planifié pour lequel une machine est engagée pour produire. Les temps d'attente ne sont pas pris en compte.

Marge de gamme : c'est la capacité du système de production à rattraper un retard sur un type de produit donné sur un horizon élémentaire de production.

Marge qualitative requise : c'est le niveau de qualité fixé auquel doivent répondre les produits fabriqués.

Horizon de production : c'est le temps nécessaire pour produire le nombre de pièces brutes fixé précédemment. L'horizon de production est fixé en tenant compte des temps d'arrêt prévus.

Horizon élémentaire de production ou cycle de production (cf. Chapitre 3, paragraphe 2.3.2.2).

Temps de cycle moyen planifié : il représente la vitesse moyenne de production des machines.

Temps d'arrêts prévus pour maintenance : ce sont les périodes réservées aux actions de maintenance préventive systématique comme le changement d'outil.

Coût de production planifié : il englobe tous les frais fixes, le coût de la main d'œuvre, le coût de l'amortissement des ressources et le coût de réalisation du travail effectué par les ressources elles-mêmes.

4.1.2. Indicateurs de résultat

Au départ, les objectifs de production sont exprimés sous forme de données fixées sur la base d'informations concernant les ressources de production et de contraintes d'exploitation et de service.

Nombre de pièces produites : c'est le nombre de pièces produites pendant l'horizon de production défini précédemment.

Nombre de pièces de chaque type produites : cette donnée est importante car la production d'un type de pièce donné peut être plus problématique que celle des autres parce que ce type de pièce sollicite des fonctionnalités particulières des machines.

Taux de charge effective des machines : c'est le taux d'occupation effective des machines pour production.

Marge consommée : c'est le temps supplémentaire consommé pour compenser un retard. Elle doit être inférieure ou égale à la marge de gamme.

Nombre de bonnes pièces : c'est le nombre de pièces produites qui répondent aux critères qualitatifs définis.

Nombre de pièces rejetées : c'est le nombre de pièces produites et qui présentent des défauts "majeurs" tels qu'ils ne peuvent être corrigés pour des raisons de coût et/ou de temps. Ce type de pièces est réutilisé comme pièce brute dans un autre cycle de production.

Nombre de pièces rectifiées : c'est le nombre de pièces produites qui présentent des défauts "mineurs" et dont le coût et/ou le temps de rectification est jugé raisonnable.

Temps effectif de production : c'est le temps mis pour produire le nombre de pièces brutes.

Retard de production : c'est le temps mis pour produire après épuisement des marges de gammes.

Coût effectif de production : c'est le coût de production planifié auquel s'ajoutent les coûts occasionnés par les retards (coût de main d'œuvre supplémentaire, coût de réalisation du

travail supplémentaire effectué par les ressources) et la rectification d'un certain nombre de pièces qui ne répondaient pas aux critères qualitatifs définis.

4.1.3. Indicateurs de processus

Taux de dérive : caractérise le comportement d'une ressource ou d'un ensemble de ressources par rapport à la tâche (de transformation ou de transfert) qu'elle doit effectuer pendant un intervalle de temps donné. C'est la différence relative entre le flux entrant et le flux sortant (Chapitre 3, paragraphe 2.3.1).

Taux de dérive propre : c'est le taux de dérive d'une ressource provoqué par sa défaillance.

Taux de dérive induit : c'est le taux de dérive d'une ressource provoqué par la défaillance d'une autre ressource du système.

Taux de dérive d'une gamme opératoire : c'est le rapport entre le flux planifié et le flux réel de la gamme. Rappelons que le flux planifié correspond au flux de pièces d'un type donné à produire ; le flux réel représente le flux de pièces produites suivant la gamme pendant l'intervalle de temps considéré (voir Chapitre 3, paragraphe 2.3.1).

Nombre de ressources dégradées : c'est le nombre de ressources que le diagnostic aura identifiées comme "défaillantes" dans le cadre de la Surveillance Prédicative Indirecte.

Temps de cycle moyen effectif : c'est la vitesse moyenne de production effective d'une machine.

Temps d'arrêts effectifs pour maintenance : c'est le temps total effectivement consacré aux actions de maintenance (préventive systématique et corrective).

Nombre d'arrêts propres pour cause de défaillance : c'est le nombre d'arrêts d'une machine dus à ses propres défaillances. En d'autres termes, c'est le nombre de fois où la machine est tombée en panne, puis réparée.

Nombres d'arrêts effectifs pour maintenance préventive : c'est le nombre d'arrêts qui ont effectivement eu lieu pour assurer les actions de maintenance préventive systématique. Ce nombre peut différer du nombre d'arrêts prévus par exemple dans le cas où une défaillance interviendrait sur le système et nécessite une (ou plusieurs) actions correctives.

Nombre d'arrêts propres : C'est le nombre d'arrêts dus à des défaillances propres ou à des mises hors service pour des actions préventives.

Nombre d'arrêts induits : c'est le nombre d'arrêts d'une ressource induits par une défaillance ou une perturbation extérieure (par exemple, famine d'une machine).

Nombre total d'arrêts : c'est le nombre d'arrêts total d'une ressource. C'est la somme des arrêts propres et des arrêts induits.

Ces indicateurs de performances permettent de tenir un tableau de bord de comparaison des objectifs et des résultats obtenus à la fin de chaque horizon élémentaire et/ou global de production. Le résultat de ces comparaisons est une aide à la prise de décision sur les actions de correction à mener par la Maintenance et la Production pour améliorer le fonctionnement du système.

4.2. Les actions de correction

Les actions de correction que nous présentons dans ce paragraphe concernent la Production et la Maintenance. Elles sont effectuées en ligne et hors ligne.

4.2.1. Les actions en ligne

Ce sont les actions engagées pendant le fonctionnement du système.

4.2.1.1. D'un point de vue Production

La production vue au sens large regroupe les fonctions de Planification, d'Ordonnancement et de Supervision (Chapitre 2, paragraphe 3).

La Planification définit le plan de production à partir des demandes des clients sur une période qui peut aller de quelques jours à plusieurs mois (c'est le programme de production) selon le type de produit fabriqué.

Ce plan de production est mis en œuvre par l'Ordonnancement qui calcule les charges de travail sur les ressources de production et détermine les séquences et les horaires de passage de ces travaux sur une base à moyen terme. Cet ordonnancement prévisionnel est transmis au Pilotage pour son application.

Le Pilotage est la fonction responsable de l'exécution du plan de production, agissant en temps réel. Il est donc chargé de gérer les en-cours et à ce titre, il doit garantir la bonne évolution de la production vers les objectifs fixés au départ.

Concrètement lorsqu'une dérive de la quantité et/ou une baisse de la qualité se produit, les actions du Pilotage peuvent aller de la plus simple à la plus complexe comme :

- L'ajustement de la cadence d'entrée des pièces dans le système pour ne pas saturer les buffers après la détection d'une défaillance ;
- La modification de certains paramètres du programme de fabrication d'une machine suite à la détection d'une baisse de la qualité due par exemple à une usure de l'outil ;
- La permutation d'opérations entre deux machines lorsqu'on détecte par exemple qu'une machine ne plus assurer une opération.

- Le transfert d'opérations sur une autre machine suite à un engorgement causé par le fait que les données de fiabilité de la machine considérée, utilisées pour établir l'ordonnancement prévisionnel ont été surestimées et que dans la réalité la machine est plus lente ;
- La correction ponctuelle du routage pour effectuer des désengorgements sur certaines parties du système ;
- Le changement précoce d'un outil ;
- etc.

4.2.1.2. D'un point de vue Maintenance

D'un point de vue Maintenance, les actions à mener en cours de production suite à la détection d'anomalies par la Surveillance Prédicative Indirecte sont de très bas niveau. Ce sont par exemple :

- Des réglages simples, ;
- Des graissages ;
- Des contrôles :
 - ◆ de température moteur,
 - ◆ de pression d'un circuit hydraulique,
 - ◆ de vitesse de coupe d'un outil (par la variation de la puissance consommée par le moteur de broche),
 - ◆ du système de lubrification des outils,
 - ◆ du système de ventilation du moteur d'une machine,
 - ◆ de la pression d'air dans les circuits hydrauliques des convoyeurs,
 - ◆ etc.
- une révision de la Surveillance Prédicative Indirecte avec ajustement de la fréquence d'acquisition des données des capteurs de surveillance en fonction de la criticité,
- etc.

4.2.2. Les actions hors ligne

4.2.2.1. D'un point de vue Production

Les actions hors ligne menées par la Production sont d'ordre stratégique. Elles se basent sur l'analyse des indicateurs de performances définies précédemment et concernent :

- Pour la Planification :

- ◆ un retour d'expérience sur les normes de qualité fixées. Ce retour d'expérience peut aider au choix du niveau de qualité des matières premières utilisées,
 - ◆ une révision des normes de qualité fixées pour les produits,
 - ◆ une amélioration du contrôle qualité effectué,
 - ◆ une révision du plan de production : suite à une dérive importante du flux de production, les objectifs quantitatifs ne sont pas atteints, il faut donc rattraper ce retard en modifiant les plans de production suivants, en puisant sur les stocks.
- Pour l'Ordonnancement : les actions effectuées dépendent des décisions de la planification et du retour d'expérience sur la fiabilité des ressources. Une révision des prochains plans de production entraînant une révision de l'ordonnancement prévisionnel tandis que le retour d'expérience sur la fiabilité des ressources permet leur prise en compte dans l'allocation des charges de travail aux ressources de production.

4.2.2.2. D'un point de vue Maintenance

Les actions hors ligne menées par la Maintenance sont de deux ordres :

D'une part, les résultats du diagnostic de la surveillance Prédictive Indirecte sont parfois insuffisants pour déterminer la cause exacte d'une dérive au niveau d'une ressource. Un diagnostic complémentaire est alors effectué hors ligne avant de mettre en œuvre les actions de réparation adéquates. Le diagnostic hors ligne est basé principalement sur la Méthode de l'arbre des Causes (MAC).

Lorsqu'une dérive du flux de production ou de la qualité est détectée puis attribuée à une machine, l'intérêt du diagnostic hors ligne est de déterminer la (ou les) cause(s) exacte(s) de cette dérive.

L'objectif principal de la MAC est de déterminer les diverses combinaisons possibles d'événements ayant entraîné l'occurrence d'un **événement indésirable**. La recherche des événements concordants doit aboutir à l'obtention des **événements de base**. Ces derniers sont généralement des événements indépendants entre eux et dont on connaît la probabilité d'occurrence. Dans le cas qui nous intéresse, l'événement indésirable représente une dérive du flux et/ou de la qualité. Les événements de base sont à rechercher au niveau de la ressource (machine, robot ou convoyeur) qui aura été identifiée comme étant à l'origine de la dérive (voir Annexe 7).

D'autre part, le retour d'expérience apporté par l'analyse des indicateurs sur les performances du système, et les résultats du diagnostic hors ligne vont induire des choix décisionnels au niveau de la Maintenance. A cela, va s'ajouter la prise en compte de la tolérance du système [Berruet 98a], [Bergot 94]. Ces choix portent sur :

- La stratégie de maintenance à appliquer à une ressource suite aux résultats de la Surveillance Prédictive Indirecte. Ces résultats indiquent par exemple qu'une dérive de flux causée par cette ressource est due à une défaillance progressive (par exemple usure précoce de son outil). On déterminera par la suite la nécessité d'un suivi plus spécifique de l'outil par une Surveillance Prédictive Directe.
- La révision de la stratégie de maintenance systématique. En effet, celle-ci peut varier en fonction du degré de sollicitation des ressources lors d'une production donnée. Par exemple, on sait que la transformation d'un type de matière première donnée entraîne une hausse plus importante de la température au niveau de l'outil et également du moteur de broche. Cela peut provoquer une détérioration plus rapide de certaines parties du moteur. Par conséquent, les actions préventives sur ce moteur doivent être adaptées.

Les deux approches d'intégration des différentes stratégies de maintenance [Sassine 98], [Bergot 94], [Bergot 95] présentées au Chapitre 1, paragraphe 8 permettent de voir comment les choix décisionnels de la Maintenance peuvent être mis en œuvre. D'autres approches basées sur la simulation [Albino 92], [Baker 94], [Krajewski 94], [Vineyard 92], ou sur des procédures graphiques [Pellegrin 96] sont également proposées.

5. CONCLUSION

Les deux approches d'intégration des différentes stratégies de maintenance [Sassine 98], [Bergot 95] présentées au Chapitre 1, paragraphe 8 nous permettent d'aborder la problématique du choix des stratégies à appliquer à chaque équipement du système.

On peut ainsi dire que la définition d'une politique de Maintenance pour un SFPM doit intégrer plusieurs critères que l'on peut regrouper en trois catégories pour la satisfaction des objectifs de production :

- Des critères fonctionnels qui intègrent la flexibilité du système (sa tolérance, et ses redondances matérielles) et les fonctions de chaque équipement (ses flexibilités et sa criticité).
- Des critères de Sûreté de fonctionnement : fiabilité, maintenabilité, disponibilité, sécurité
- Des critères économiques : coût de maintenance, coût de production.

Le choix des stratégies de maintenance doit être fait dans un contexte où les différentes fonctions de la Maintenance sont bien définies et bien identifiées. C'est le problème de l'intégration de la Maintenance au Contrôle/Commande des SFPM que nous avons abordé au Chapitre 2 de ce mémoire. Nous savons que le niveau d'automatisation des systèmes de production a entraîné une plus grande complexité des équipements et par conséquent une masse d'informations et d'actions plus importantes à gérer par toutes les composantes du

système. La Fonction Maintenance n'est pas en reste. Ce qui explique l'utilisation d'outils informatique (MAO) pour gagner en efficacité, rapidité et technicité.

La Surveillance Prédictive Indirecte est en elle-même une méthode d'analyse des performances des ressources du système dans la mesure où ses résultats constituent une aide à la décision sur la (ou les) stratégies de maintenance à appliquer compte tenu des objectifs fixés par la Direction de la production.

En effet, à partir des résultats d'une analyse de la qualité ou du flux, on peut évaluer l'impact d'une baisse de performance des ressources sur la production, et décider ainsi des stratégies de maintenance les plus appropriées pour éviter les dérives du système. Ainsi, connaissant le délai d'intervention donné par le pronostic, la Maintenance peut mieux organiser ses interventions en actions préventives et diminuer ainsi les actions correctives. Concrètement, la fonction de décision de la Maintenance sera chargée compte tenu de la défaillance qui a été détectée, de sa gravité et de son impact sur les objectifs de production de décider de choix approprié des actions d'intervention à effectuer et de leur date d'exécution en concertation avec d'autres fonctions du Contrôle / Commande, notamment le Recouvrement.

Conclusion

L'approche de Surveillance Prédicative Indirecte que nous avons présentée au Chapitre 3 a permis de définir une nouvelle stratégie de maintenance basée sur l'analyse par la quantité des produits fabriqués pour suivre l'état des ressources et leur impact sur la production. Nous avons dénommé cette nouvelle stratégie de maintenance : Maintenance Prédicative Indirecte. Elle vient s'ajouter aux autres stratégies de maintenance présentées au Chapitre 1 qui sont : la Maintenance palliative, la Maintenance Curative, la Maintenance Préventive Systématique et la Maintenance Prédicative Directe. On pourrait en citer d'autres [Sassine 98] regroupées sous le terme de Maintenance Mixte qui constituent un fusionnement d'une (ou plusieurs) Maintenance Corrective avec une (ou plusieurs) Maintenance Préventive respectant des règles données.

L'exploitation des résultats de la Surveillance Prédicative Indirecte que nous avons présentée au Chapitre 4 particulièrement à travers les phases de pronostic et de mise en œuvre d'actions de correction permet de voir les apports de cette méthode pour la Maintenance et la Production. En effet, sur des intervalles réguliers de fonctionnement, une évaluation des différents objectifs de production et de maintenance peuvent être faits notamment grâce aux indicateurs de performances que nous avons définis afin de réajuster si besoin les stratégies appliquées. Comme nous l'avons souligné dans la conclusion du Chapitre 4, l'objectif final de tout ceci est de fédérer les contraintes économiques et de Sûreté de Fonctionnement.

Une approche par la qualité de la Surveillance Prédicative Indirecte permettrait de renforcer cette méthode.

En général, l'exploitation du contrôle qualité s'arrête à la Production, qui s'en sert pour vérifier que les normes de qualité qu'elle s'est fixée sont bien respectées tout au long de la production. Nous voulons montrer que cette approche peut aussi servir à la Maintenance par les informations que cela lui apporterait sur l'état des ressources, et les performances qu'elles doivent avoir.

Comme nous l'avons déjà souligné, les mesures effectuées pour surveiller la qualité des produits ne peuvent pas toujours être faites systématiquement. La configuration physique du système et/ou le coût des systèmes de mesures utilisés en contrôle qualité font que les mesures sont effectuées à des endroits précis du système. L'apport de la Surveillance Prédicative Indirecte se situe alors dans la démarche qu'elle met en œuvre pour discriminer les sources d'une dérive de la qualité à partir des résultats du contrôle qualité. Cette démarche est d'autant plus intéressante qu'elle permet de renforcer l'approche quantitative lorsqu'une dérive de la qualité est à l'origine d'une dérive de flux.

Le contrôle qualité en cours de fabrication intervient globalement de deux façons :

- Il peut être effectué sur la machine. Dans ce cas, il est effectué par un système de mesure incorporé à la machine et qui lui permet de réajuster son programme de fabrication en fonction des anomalies détectées. Ce type de contrôle ne représente pas d'intérêt pour la Surveillance Prédictive Indirecte.
- Le contrôle peut être effectué par des systèmes spécialisés (robots de mesure ou contrôle visionique) à des étapes intermédiaires ou en sortie du système. C'est sur ce type de contrôle que se baserait la Surveillance Prédictive Indirecte. L'objectif est de rechercher l'origine d'un défaut. Par exemple, pour un défaut de cotation, on recherchera la machine "défaillante" parmi celles qui ont effectué l'opération.

Contrairement à l'approche quantitative où nous disposons d'un seul paramètre (le flux) pour établir notre raisonnement, nous disposons dans le cadre de l'approche par la qualité de plusieurs paramètres tels que les cotes d'une pièce, l'état de surface, etc. Cette approche pourra être abordée dans une prochaine étude. Nous donnons cependant en Annexe 8 une vue générale du contrôle qualité.

Conclusion Générale

Dans ce mémoire, nous avons abordé l'optimisation de la Maintenance dans les SFPM.

Notre contribution a porté sur deux aspects principaux : l'intégration de la Maintenance au Contrôle/Commande et la définition d'une stratégie de Maintenance Prédictive basée sur la Surveillance Prédictive Indirecte.

La première partie du mémoire a porté sur la problématique de la Maintenance. Nous avons dans ce cadre présenté l'état de l'art sur différents travaux traitant de la Maintenance, et à travers lesquels nous avons pu identifier deux approches d'analyse. La première porte sur l'organisation de la Maintenance, et la seconde sur les stratégies de maintenance. Ces deux approches ont toutes les deux pour objectif d'améliorer les "prestations" de la Maintenance en optimisant sa fonction.

Dans le cadre de l'intégration de la Maintenance au Contrôle / Commande, nous avons défini ses différentes fonctions et ses liens avec les autres fonctions. Nous avons ainsi montré tout au long du Chapitre 2 l'intérêt et le besoin qu'il y avait de prendre en compte l'aspect en ligne de la Maintenance. Celui-ci permet en effet de voir dans quelle mesure la Maintenance peut participer à l'accomplissement des objectifs de production par une prise en compte en temps réel des contraintes de production et de l'évolution de celle-ci. Ces contraintes se traduisent pour la Production par des coûts minimaux, des délais les plus courts possibles, et une qualité optimale des produits. Pour la Maintenance, elles se traduisent par une disponibilité et une fiabilité maximale des ressources. Cela signifie concrètement que toutes les ressources doivent être prises en compte dans une politique de maintenance qui tienne compte de leurs caractéristiques et de celles du système de production, notamment les flexibilités.

Des méthodes telles que la Maintenance Basée sur la Fiabilité [Zwingelstein 96] permettent par une analyse structurelle et fonctionnelle du système d'identifier les différentes catégories de ressources dont chacune suit une ou plusieurs stratégies de maintenance. Cette méthode a fait ses preuves dans différents types de systèmes. Nous pensons cependant que bien que la politique de maintenance qui en découle soit une politique globale, elle ne permet pas de prendre en compte efficacement les besoins de la production en matière de maintenance. L'analyse est en effet effectuée seulement du point de vue de la Maintenance qui est d'assurer a priori la fonction des ressources sans que leurs performances ne soient véritablement garanties a fortiori. Mieux, la politique de maintenance n'est pas forcément optimale dans la mesure où en plus des interventions découlant de la Maintenance préventive, elle doit prendre en compte un certain taux de maintenance corrective qui découle directement des demandes de la Production à chaque fois qu'une défaillance que celle-ci juge "significative" survient.

Il en résulte une hausse des coûts de maintenance à cause d'interventions "inutiles" ou mal effectuées, parce que la Maintenance n'a aucun critère propre pour juger de leur gravité et de l'opportunité qu'elle a d'intervenir.

Nous avons pensé que le meilleur moyen pour résoudre ce problème est de "rapprocher" les objectifs de la Maintenance et ceux de la Production qui sont parfois contradictoires, en définissant un repère commun d'interprétation des événements qui surviennent pendant la production. Nous avons donc introduit une nouvelle approche de surveillance appelée Surveillance Prédictive Indirecte qui vient en complément des autres méthodes de surveillance déjà existantes. Le terme "prédictive" signifie que l'état des ressources est suivi a priori ; le terme "indirecte" quant à lui indique que le suivi est effectué grâce à des paramètres permettant d'évaluer l'impact de la défaillance d'une ressource sur le système. Les deux principaux paramètres que nous avons ainsi identifiés sont la qualité des produits fabriqués et leur flux de production (dite approche quantitative).

La deuxième partie de ce mémoire a porté essentiellement sur la présentation de la Surveillance Prédictive Indirecte par l'approche quantitative (Chapitre 3). Nous avons ensuite montré au Chapitre 4 la façon dont la méthode de surveillance prédictive indirecte est évaluées et exploitée par la Maintenance et les autres fonctions du Contrôle / Commande.

Le principe de la Surveillance Prédictive Indirecte est de détecter des dérives au niveau du flux de production, d'identifier l'origine de la dérive et ensuite d'analyser la cause de cette dérive. Nous avons supposé que la cause d'une dérive est liée à l'état défaillant d'une ressource ayant entraîné une baisse de ses performances, et donc un retard dans l'accomplissement de sa fonction de production par rapport à celle qui lui avait été définie au départ.

La Surveillance Prédictive Indirecte a donné des résultats intéressants que nous avons présentés au Chapitre 4. Les horizons élémentaires que nous avons définis nous ont permis d'observer le fonctionnement du procédé. Nous avons développé un programme de diagnostic à partir de règles qui, sur la base des données de la simulation permettent de retrouver la (ou les) ressource(s) défaillante(s) du système.

L'étude de la Surveillance Prédictive Indirecte n'a pas été des plus aisée dans la mesure où elle a fait appel à des notions provenant de disciplines diverses pour ne citer que la gestion de production à travers l'Ordonnancement, la Surveillance à travers la Détection, le Diagnostic et le Pronostic, et enfin la Maintenance qui était notre objectif final.

La polyvalence des disciplines sur lesquelles repose la Surveillance Prédictive Indirecte a cependant suscité un intérêt majeur dans la mesure où elle nous a permis de faire le lien entre la Surveillance Prédictive Indirecte et chacune d'entre elles.

Dans le cadre de la Gestion de production où les méthodes d'ordonnancement proposées ne prennent pas en compte les défaillances et les perturbations pouvant survenir au niveau des ressources, la Surveillance Prédictive Indirecte représente un bon moyen d'évaluation de l'applicabilité de la commande établie. Elle permet ainsi de détecter les retards qui peuvent alors être rectifiés par le Pilotage.

Nous avons vu avec les résultats de la simulation que laisser le système évoluer de la même façon après qu'une défaillance ait été détectée et la ressource qui en est la cause localisée n'est pas une situation admissible dans la réalité. Ainsi, l'objectif du Pilotage sera de corriger l'évolution du système pour éviter la saturation de certains buffers. Une manière de procéder sera par exemple de réajuster l'entrée des pièces à la nouvelle cadence de fonctionnement tant qu'une opération de maintenance n'aura pas été mise en œuvre pour éliminer la défaillance.

Dans le cadre de la Surveillance, la Surveillance Prédictive Indirecte vient en complément de la Surveillance Curative et parfois comme méthode préalable à une Surveillance Prédictive Directe. Dans une démarche d'optimisation des méthodes de surveillance qui représentent parfois des coûts non négligeables (il suffit de penser à l'analyse de la qualité, à l'analyse vibratoire ou encore à l'analyse des huiles), la Surveillance Prédictive Indirecte permet d'identifier les redondances entre les différentes méthodes afin de mieux les exploiter en établissant une politique de surveillance intégrée comme celle que nous avons développée pour la Maintenance.

Dans le cadre de la Maintenance et aussi de la Production, le Pronostic que nous avons présenté aux Chapitres 3 et 4 montre qu'il est possible à partir des résultats de la Surveillance Prédictive Indirecte de mieux planifier la politique de production et de maintenance de l'entreprise. Les indicateurs de performances que nous avons définis montrent comment ces résultats peuvent être exploités.

Nous ne terminerons pas cette analyse sans évoquer les limites actuelles de la Surveillance Prédictive Indirecte et les perspectives de recherche qu'elle ouvre dans ce domaine en plus de celles que nous venons d'évoquer.

La principale limite de cette méthode est la "déteçtabilité" d'une dérive face aux marges existantes sur les machines. Pour l'instant, nous ne savons pas détecter une dérive lorsqu'elle est absorbée par une marge parce que notre étude a été basée sur l'hypothèse "Temps constant". Ainsi, la simulation a montré qu'il fallait allonger le temps de cycle des machines d'une valeur supérieure à leur marge pour pouvoir détecter une dérive. Cela induit des augmentations de temps de cycle qui pourraient sembler exagérées dans des conditions de fonctionnement réelles. Notons cependant que cette augmentation est tout fait admissible dans le cas où les temps de cycle des machines sont allongés pour atteindre un niveau de qualité donné. Afin de résoudre de manière théorique ce problème, une prise en compte de l'hypothèse "Nombre de pièces constant" pourrait éventuellement nous permettre une meilleure prise en compte des marges. Cette faiblesse doit cependant être relativisée dans la mesure où la position de la machine dans une gamme et sa vitesse influent sur la capacité de la machine à "absorber" une dérive. En effet, pour tout système de production, pour toute gamme, il existe une machine menante (la plus lente) qui impose son rythme de fonctionnement aux autres machines du système. Les positions des machines menantes vis à

vis des différentes gammes opératoires détermine en grande partie la capacité du système à supporter des perturbations. Ainsi, on peut envisager en tenant compte de la configuration du système d'améliorer la méthode de détection en effectuant par exemple un placement des capteurs qui tienne compte des positions des machines menantes. Une méthode d'analyse rigoureuse permettrait par la suite d'établir l'ensemble des scénarios possibles de propagation de la dérive.

Parmi les principaux axes de recherche à développer pour compléter ce travail, nous citons :

1. L'étude de l'approche par la qualité,
2. L'étude de l'approche quantitative pour des modes de conduite autres que le fonctionnement cyclique et pour cette dernière la possibilité de surveiller le système en régime transitoire.

La simulation que nous avons effectuée sous Witness a été d'un grand apport pour la maîtrise des règles de conduite et de fonctionnement du système. Une application "grandeur nature" de la Surveillance Prédictive Indirecte permettrait de prouver l'intérêt non négligeable de cette méthode.

Références bibliographiques

[AFNOR]

Recueil de normes françaises X 06-010, X 60-010, AFNOR

[Albino 92]

V. ALBINO, G. CARELLA, OG. OKOGBAA

Maintenance policies in just-in-time manufacturing lines, International Journal of Production Research, vol. 30, n°2, pp. 369-382, 1992.

[Artigues 97]

C. ARTIGUES

Ordonnancement en temps réel d'ateliers avec temps de préparation des ressources, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, décembre 1997.

[Ascometal 95]

Documentation sur la GMAO, ASCOMETAL Les Dunes, 1995

[Azevedo 95]

C. AZEVEDO, M. COURREGES

La systématique appliquée à la maintenance industrielle - Vieux concepts, nouveaux débats. Maintenance & Entreprise, n° 479, mars 1995, p. 2-7.

[Bajic 88]

E. BAJIC

Intégration du contrôle qualité en production automatisée : Application à un îlot automatisé de fabrication de pièces mécaniques, Thèse de doctorat, Université de Nancy 1, mars 1998.

[Basseville 87]

M. BASSEVILLE, A. BENVENISTE, G. MOUSTAKIDES, A. ROUGE

Detection and Diagnosis of changes in the eigenstructure of non stationary multivariable system, Automatica vol. 23 n° 4, juillet 1987.

[Basseville 88]

M. BASSEVILLE

Detecting Changes in signals and systems - A survey, Automatica, vol. 24, n°3, pp. 309-326, 1988.

[Baker 94]

R.D. BAKER, A.H. CHRISTER

Review of delay-time OR modelling of engineering aspects of maintenance, European Journal of Operational Research, n°73, PP. 407-422, 1994.

[Bergot 94]

M. BERGOT, L. GRUDZIEN, D. MENEXIADIS

Une approche intégrée des fonctions de maintenance, , revue d'Automatique et de Productique Appliquée, Vol. 7, n°5, PP. 581-591, 1994.

[Bergot 95]

M. BERGOT

ADEMIS, une aide à la définition des stratégies de maintenance, Méthodes et outils de conception : Supervision, Sûreté des automatismes, Méthodologie de développement, CETIM, pp. 144-157, 1995

[Berruet 96]

P. BERRUET ET F. LY

Terminologie et approche fonctionnelle de la Supervision, Note Interne NI 96/3, L.A.I.L. Ecole Centrale de Lille, octobre 1996.

[Berruet 98a]

P. BERRUET

Contribution au recouvrement des systèmes flexibles de production manufacturière : analyse de la tolérance et reconfiguration, Thèse de doctorat, Université de Lille 1, décembre 1998.

[Berruet 98b]

P. BERRUET, A. K; A. TOGUYENI, S. EL KHATTABI, E. CRAYE

Using Tolerance results to improve reconfiguration process in Flexible Manufacturing process, IEEE SMC'98, 11-14 octobre 1998, San diego, USA.

[Bois 91]

S. BOIS

Intégration de la Gestion des Modes de marche dans le pilotage d'un système automatisé de production, Thèse de doctorat, Université des Sciences et techniques de Lille Flandres Artois, novembre 1991.

[Bonnefous 93]

C. BONNEFOUS

Les indicateurs de performances, Pole Infos, Pôle Productique Rhône-Alpes, n°25, mai 1993.

[Brunet 90]

J. BRUNET, D. JAUME, M. LABARERE, A. RAULT, M. VERGE

Détection et diagnostic de pannes : approche par modélisation, Ed. Hermès, 1990.

[Buzacott 78a]

J. A. BUZACOTT, L. E. HANIFIN

Models of automatic transfer lines with inventory banks - a review and comparison, IIE Transaction, vol. 10, p. 197 - 207, 1978.

[Buzacott 78b]

J. A. BUZACOTT, L. E. HANIFIN

Transfer line design and analysis - an overview, IIE Conference, 1978.

[Buxey 73]

G. M. BUXEY, N. D. SLACK, R. WILD

Production flow line system design - a review, AIIE Transaction vol. 5, p. 37 - 48, 1973.

[Camus 97]

H. CAMUS

Conduite des systèmes flexibles de production manufacturière par composition des régimes permanents cycliques : modélisation et évaluation des performances à l'aide des Réseaux de Petri, Thèse de doctorat, Université de Lille 1, mai 1997.

[Cauffriez 96]

L. CAUFFRIEZ, D. WILLAEYS, J. DEFRENNE

A method and Diagnosis system to value the production performances of Manufacturing Flow-line systems, IEEE SMC Cesa'96, p. 814 - 819.

[Cernault 88]

A. CERNAULT

Simulation des systèmes de production, Ed. Cepadues, 1988.

[Cetim 95]

La maintenance préventive dans les ateliers d'usinage. CETIM Informations n°144, juin 1995.

[Chu 92]

C. CHU, J.M. PROTH

Predictive Maintenance : a method based on data analysis techniques, Workshop on quality, Maintenance and Reliability Management, Bruxelles, 1992

[Combacau 91]

M. COMBACAU

Commande et surveillance des systèmes à événements discrets complexes : application aux ateliers flexibles, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, décembre 1991.

[Craye 94]

E. CRAYE

Contribution au Contrôle/Commande des Systèmes Flexibles de Production Manufacturière, Habilitation à Diriger des Recherche, Université de Lille 1, décembre 1994.

[Dallery 92]

Y. DALLERY, S. B. GERSHWIN

Manufacturing flow line systems : a review of models and analytical results, Queueing Systems, vol. 12, 1992, p. 3 - 94.

[El Khattabi 93]

S. EL KHATTABI

Intégration de la surveillance de bas niveau dans la conception des systèmes à Evénements discrets : application aux systèmes de production flexibles, Thèse de doctorat, Université de Lille 1, septembre 1993.

[Gentina 97]

L.A.I.L., Equipe GENTINA, LAB Besançon, Equipe BAPTISTE, E3I-LIT Tours, Equipe PROUST

Intégration des différents niveaux de commande dans le pilotage d'un système de production : de la planification prédictive au pilotage réactif et à la supervision, Projet EOWYN, Rapport final, avril 1997.

[Getan 94]

E. GETAN

Une contribution à la productique : modélisation des données pour la maintenance intégrée des systèmes automatisés de production, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Paris, décembre 1994.

[Kaufmann 68]

A. KAUFMANN

Introduction à la combinatoire en vue de ses applications, Ed. Dunod, 1968.

[Kermad 94]

L. KERMAD, E. CRAYE, J.-C BOUREY, J.-C. GENTINA

The working and exploiting mode in FMS, 2nd IEEE Workshop on Real-time Applications, pp. 116-121, Washington, DC. 21-22 juillet 1994.

[Kermad 96]

L. KERMAD

Contribution à la supervision et à la gestion des modes et des configurations des systèmes flexibles de production manufacturière, Thèse de doctorat, Université de Lille 1, janvier 1996.

[Korbaa 97]

O. KORBAA, H. CAMUS, J.-C. GENTINA

FMS Cyclic Scheduling with Overlapping production cycles, 18th International Conference on Application and Theory of Petri Nets, Toulouse, France, juin 1997.

[Korbaa 98]

O. KORBAA

Commande cyclique des systèmes flexibles de production manufacturière à l'aide des réseaux de Petri : de la planification à l'ordonnancement des régimes transitoires, Thèse de doctorat, Université de Lille 1, juin 1998.

[Krajewski 94]

L.J. KRAJEWSKI, C. SHEU

A decision model for corrective maintenance management, International Journal of Production Research, vol. 32, n°6, pp. 1365-1382, 1994.

[Laprie 95]

J.C. LAPRIE

Guide de la sûreté de fonctionnement, Toulouse, Ed. Cépaduès, 1995.

[Latrèche 98]

S. LATRECHE

Towards a methodology for maintenance development in Manufacturing systems, CESA'98, p. 100-105, Nabeul-Hammamet, Tunisie, avril 1998.

[Leger 98a]

J.-B. LEGER, B. IUNG, A. FERRO DE BECA, J. PINOTEAU

An innovative approach for new Distributed Maintenance System : application to Hydro Power Plants of REMAFLEX project, à paraître dans Computers In Industry, Elsevier Science.

[Leger 98b]

J.-B. LEGER, E. NEUNREUTHER, B. IUNG, G. MOREL

Integration of the Predictive Maintenance in Manufacturing System, 3rd European Robotics, Intelligent Systems and Control conference, Athènes (Grèce), 22-25 juin 1998.

[Lhoste 86]

F. LHOSTE

Application de la modélisation de la partie opérative à la structuration de la commande, Actes du congrès AFCET "Méthodes et outils modernes de conception et d'exploitation de la commande des procédés discontinus complexes". Montpellier, 5-7 mars 1986.

[Lhoste 91]

F. LHOSTE

Surveillance des M.E.S.A.P. : les atouts de la modélisation de comportement, Journées d'études du groupe GT2 du Pôle SED, Paris, 7 février 1991.

[Ly 96]

F. LY

La Problématique de la Maintenance, Note Interne NI/96/4 L.A.I.L Ecole Centrale de Lille, octobre 1996.

[Ly 97]

F. LY, A.K.A. TOGUYENI, E. CRAYE

Predictive Maintenance and Monitoring in Flexible Manufacturing Systems, 15th IMACS World Congress, Berlin, août 1997 Vol. 5 : Systems Engineering, Ed. Wissenschaft & Technik Verlag, p. 415 - 420.

[Ly 98a]

F. LY, A.K.A. TOGUYENI, E. CRAYE

A Detection approach applied to Production Flows deviation in Flexible Manufacturing Systems, CESA'98 IMACS Multiconference. Computational Engineering in Systems Applications, Vol 3, pp. 95-99, Nabeul - Hammamet, Tunisie, 1-4 avril 1998.

[Ly 98b]

F. LY, A.K.A. TOGUYENI, E. CRAYE

A Real-time Diagnosis method of production flow deviation in Flexible Manufacturing systems, WODES'98, 4th Workshop on Discrete Event Systems, p. 343-348, Cagliari, Italie, août 1998.

[Ly 98c]

F. LY, Z. SIMEU-ABAZI, J.-B. LEGER

Terminologie Maintenance : bilan, Groupe de Recherche en Productique, Groupe de travail Systèmes de Production Sûrs de Fonctionnement (SPSF), <http://www-lag.ensieg.inpg.fr/recherche/bilanmaintenance.html>

[Ly 98d]

F. LY

Indirect Predictive Monitoring in Flexible Manufacturing Systems, accepté à Robotics and Computer Integrated Manufacturing Systems (anciennement Computer Integrated Manufacturing Systems), Elsevier Science, 1998.

[Lyonnet 92]

P. LYONNET

La Maintenance : mathématique et méthodes, Ed. Lavoisier TEC& DOC, 1992.

[Mobley 90]

R. K. MOBLEY

La Maintenance Prédictive, Ed. Masson 1990.

[Monchy 88]

F. MONCHY

La fonction maintenance : formation à la gestion de la maintenance industrielle, Ed. Masson 1988.

[Monsef 96]

Y. MONSEF

Modélisation et simulation des systèmes complexes, Lavoisier TEC & DOC, 1996.

[Morel 92]

J. MOREL

Vibration des machines et diagnostic de leur état mécanique, Ed. Eyrolles, 1992.

[Ndiaye 98]

M. BIGAND, D. CORBEEL, D. N'DIAYE, J.-P. BOUREY

Extension of object formalism for representing the dynamics : application to the integration of viewpoints in the design of a production system, IDMME'98, Compiègne - France 1998, vol. 4, pp. 1169-1176.

[Odysseywin 97]

Notice Technique DELTA Sud-Est Technologies, 1997.

[Ohl 95]

H. OHL

Fonctionnements réactifs des systèmes flexibles de production manufacturière : analyse et optimisation des performances à l'aide des Réseaux de Petri, Thèse de doctorat, Université de Lille 1, septembre 1995.

[Paytner 61]

M. PAYTNER

Analysis design of engineering systems, MIT Press, 1961.

[Pellegrin 96]

C. PELLEGRIN

D'un modèle normatif à l'aide à la décision : un exemple de conception en Maintenance Préventive, GIS : 5ème congrès International de Génie Industriel, Vol. 3, pp. 175-180, 2-4 avril 1996, Grenoble (France)

[Proth 94]

J.-M. PROTH, X.L. XIE

Les réseaux de Petri pour la conception et la gestion des systèmes de production, Ed. Masson, 1994.

[Roubellat 88]

F. ROUBELLAT et V. THOMAS

Une méthode et un logiciel pour l'ordonnancement en temps réel d'ateliers, APII 1988, vol 22, p. 419-438.

[Sahraoui 87]

A.E.K. SAHRAOUI

Contribution à la surveillance et à la commande d'ateliers, Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1987.

[Sassine 98]

C. SASSINE

Intégration des politiques de maintenance dans les systèmes de production manufacturiers, thèse de doctorat, Université de Grenoble 1, Juin 1998.

[Simeu-Abazi 98]

Z. SIMEU-ABAZI

Sur la Sûreté de Fonctionnement des systèmes de production, Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Grenoble I, janvier 1998.

[Staroswiecki 96]

M. STAROSWIECKI, J.-PH. CASSAR

Approche structurelle pour la conception des système de surveillance, Ecole d'été d'Automatique de Grenoble, Surveillance des systèmes continus, septembre 1996, Tome 1.

[Surenda 98]

M. GUPTA SURENDA AND A. Y. AL-TURKI YOUSEF

Adapting just-in-time manufacturing systems to preventive maintenance interruptions, Production Planning & Control, 1998, Vol. 9, n° 4, p. 349-359.

[Tawegoum 95]

R. TAWEGOUM

Contrôle temps réel du déroulement des opérations dans les systèmes de production flexibles, Thèse de doctorat, Université de Lille 1, avril 1995

[Tawegoum 97]

R. TAWEGOUM, E. CASTELAIN

The design of decisional level for dynamic production flow control in flexible manufacturing systems, CASCD'97 - IFAC, Gent avril 1997, p. 237 - 242.

[Thomas 80]

V. THOMAS

Aide à la décision pour l'ordonnancement d'atelier en temps réel, thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, 1980.

[Toguyeni 92]

A.K.A TOGUYENI

Surveillance et diagnostic en ligne dans les ateliers flexibles de l'industrie manufacturière, Thèse de doctorat, Université de Lille 1, novembre 1992.

[Villemeur 88]

A. VILLEMEUR

Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels, Ed. Eyrolles, 1988.

[Vineyard 92]

M.L. VINEYARD, J. MEREDITH

Effect of maintenance policies on FMS failure, International Journal of Production Research, vol. 30, n°11, pp. 2647-2657, 1992.

[Witness 94]

Manuel d'utilisateur, Witness Version 6.0, AT&T TSTEL, 1994.

[Yadayan 97]

T. YADAYAN, M. BURDEKIN

In-process dimensional measurement and control of workpiece accuracy, International Journal of Machine Tools Manufacturing, vol 37, n° 10, pp. 1423-1439, 1997.

[Zwingelstein 95]

G. ZWINGELSTEIN

Diagnostic des défaillances : théorie et pratique pour les systèmes industriels, Ed. Hermès 1995.

[Zwingelstein 96]

G. ZWINGELSTEIN

La maintenance basée sur la fiabilité : guide pratique d'application de la RCM, Ed. Hermès 1996.

ANNEXES

Sommaire

ANNEXE 1 : Placement des capteurs	169
ANNEXE 2 : Programme de simulation	174
ANNEXE 3 : Résultats de la Simulation de la gamme opératoire GO₁	199
Notations	200
Annexe 3.A : Données du fonctionnement normal	200
Annexe 3.B : Données du fonctionnement défaillant	202
1. M2 défaillante	202
2. M1 défaillante	204
3. M3 défaillante	206
ANNEXE 4 : Résultats de la Simulation des trois gammes opératoires GO₁, GO₂ et GO₃	209
Notations	210
Annexe 4.A : Fonctionnement normal	210
1. Gamme GO ₁	210
2. Gamme GO ₂	211
3. Gamme GO ₃	212
Annexe 4.B : Données du fonctionnement défaillant	213
1. M2 défaillante	213
1.1. Gamme GO ₁	213
1.2. Gamme GO ₂	214
1.3. Gamme GO ₃	214
2. M1 défaillante	215
2.1. Gamme GO ₁	215
2.2. Gamme GO ₂	216
2.3. Gamme GO ₃	216
ANNEXE 5 : Programme de traitement des fichiers de données Witness	218
ANNEXE 6 : Programme de diagnostic	221
Programme de diagnostic	222
Défaillance de la machine M1	226
Défaillance de la machine M2	239
ANNEXE 7 : Diagnostic hors-ligne pour identifier l'origine d'une dérive du flux ou de la qualité	252
ANNEXE 8 : le contrôle qualité	257
1. Le contrôle qualité : définition	258
2. Les outils de contrôle qualité [Bajic 88]	259
3. Exploitation du contrôle qualité	261

ANNEXE 1 : Placement des capteurs

Méthode de Maghout

Soit $G = (X, \Gamma)$ un graphe orienté tel que :

$X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ est l'ensemble des sommets du graphe et Γ une application définie par :

$$\Gamma : X \rightarrow P(X)$$

$$X_i \rightarrow \Gamma\{X_i\}$$

où $\Gamma\{X_i\}$ est l'ensemble des successeurs de X_i (i.e. $\forall X_j \in \Gamma\{X_i\}, \exists$ un arc orienté de X_i à X_j noté u_{ij}).

Un ensemble $T (\subset X)$ est dit "extérieurement stable" si pour chaque sommet $X_i \notin T$, nous avons :

$$\Gamma\{X_i\} \cap T \neq \emptyset \quad (1)$$

En d'autres termes, chaque sommet $X_i \notin T$ est relié à au moins un sommet $X_j \in T$ par un arc qui a son origine dans l'ensemble $(X - T)$.

L'équation (1) peut alors s'écrire :

$$\forall X_i \in X, [\{X_i\} \cup \Gamma\{X_i\}] \cap T \neq \emptyset \quad (2)$$

ou encore :

$$\forall X_i \in X, (X_i \in T \text{ ou } (\exists X_j / X_j \in T \text{ et } X_j \in \Gamma\{X_i\})) \quad (3) \quad \text{est vraie}$$

Nous définissons la projection p_T :

$$X \rightarrow \{0, 1\}$$

$$X_i \rightarrow x_i \quad / \quad x_i = 1 \text{ si } X_i \in T$$

$$x_i = 0 \text{ si } X_i \notin T$$

et $p_{\Gamma\{X_i\}}$ la projection :

$$X \rightarrow \{0, 1\}$$

$$X_j \rightarrow \alpha_{ij} \quad / \quad \alpha_{ij} = 1 \text{ si } X_j \in \Gamma\{X_i\}$$

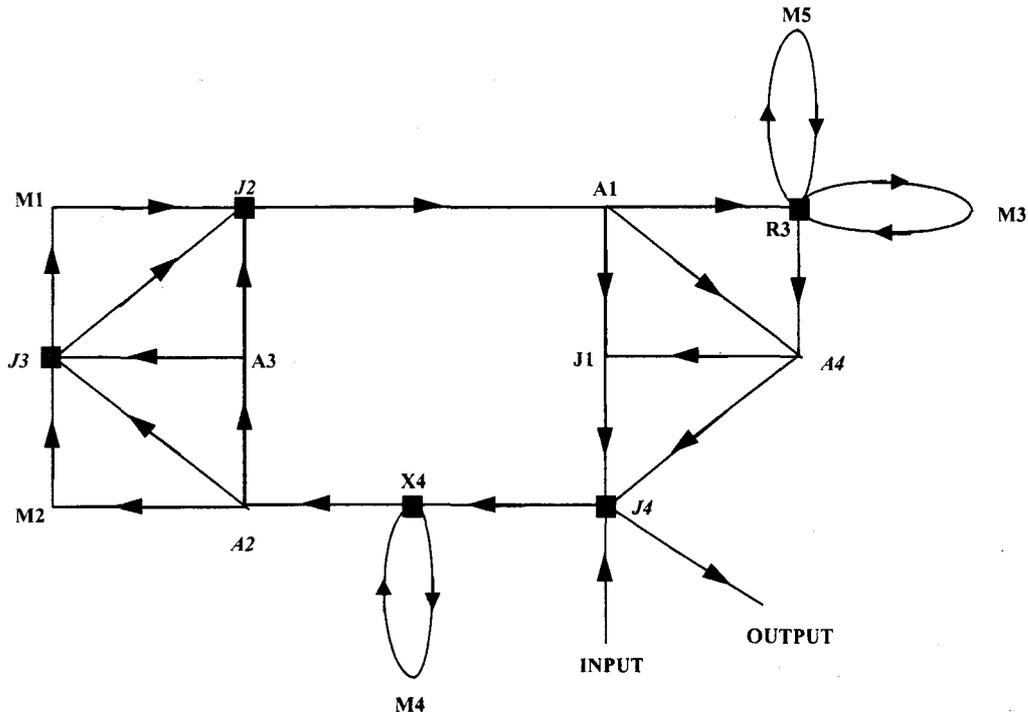
$$\alpha_{ij} = 0 \text{ si } X_j \notin \Gamma\{X_i\}$$

La relation (1) devient :

$$\dot{\prod}_i (x_i + \dot{\sum}_j \alpha_{ij} x_j) = 1 \quad (4)$$

$\dot{\prod}$ et $\dot{\sum}$ sont respectivement la multiplication et l'addition booléennes.

Considérons le graphe ci-dessous équivalent au système de production étudié.



L'équation (4) appliquée à l'ensemble des sommets du graphe donne :

$$(m1 + j2)(m2 + j3)(m3 + r3)(m4 + x4)(m5 + r3)(j1 + j4)(j2 + a1)(j3 + m1 + j2)(j4 + x4 + Output)(a1 + r3 + j1 + a4) \\ (a2 + a3 + m2 + j3)(a3 + j2 + j3)(a4 + j1 + j4)(Input + j4)(x4 + a2 + m4)(r3 + m3 + m5 + a4)Output = 1$$

$$\Leftrightarrow (m1 + j2)(j2 + a1)(m2 + j3)(a3 + j2 + j3)(m3 + r3)(m5 + r3)(a1 + r3 + j1 + a4) \\ (Input + j4)(j1 + j4)(m4 + x4)Output = 1$$

$$\Leftrightarrow [m1(j2 + a1) + j2][m2(a3 + j2 + j3) + j3][(m3m5 + r3)(a1 + r3 + j1 + a4)][Input(j1 + j4) + j4][m4 + x4]Output = 1$$

$$\Leftrightarrow (m1a1 + j2)(m2a3 + m2j2 + j3)(m3m5 + r3)(a1 + r3 + j1 + a4)(Inputj1 + j4)(m4 + x4)Output = 1$$

$$\Leftrightarrow (m1a1m2a3 + m1a1m2j2 + m1a1j3 + j2m2a3 + m2j2 + j2j3)(m3m5 + r3)(m4 + x4) \\ (Inputj1a1 + Inputj1r3 + Inputj1 + Inputj1a4 + j4a1 + j4r3 + j4j1 + j4a4)Output = 1$$

$$\Leftrightarrow (m1a1m2a3 + m1a1j3 + m2j2 + j2j3)(m3m5 + r3)(Inputj1 + j4a1 + j4r3 + j4j1 + j4a4)(m4 + x4)Output = 1$$

$$\Leftrightarrow (m4m1a1m2a3 + m4m1a1j3 + m4m2j2 + m4j2j3 + x4m1a1m2a3 + x4m1a1j3 + x4m2j2 + x4j2j3)Output \\ (m3m5j1Input + m3m5j4a1 + m3m5j4r3 + m3m5j4j1 + m3m5j4a4 + r3j1Input + r3j4a1 + r3j4 + r3j1j4 + r3j4a4) = 1$$

$$\Leftrightarrow (m4m1a1m2a3 + m4m1a1j3 + m4m2j2 + m4j2j3 + x4m1a1m2a3 + x4m1a1j3 + x4m2j2 + x4j2j3)Output \\ (m3m5j1Input + m3m5j4a1 + m3m5j4j1 + m3m5j4a4 + r3j1Input + r3j4) = 1$$

Nous obtenons après développement les 48 sous-ensembles suivants :

$m4m1a1m2a3m3m5j1InputOutput = 1$	$m4m1a1m2a3m3m5j4a1Output = 1$
$m4m1a1m2a3m3m5j4j1Output = 1$	$m4m1a1m2a3m3m5j4a4Output = 1$
$m4m1a1m2a3r3j1InputOutput = 1$	$m4m1a1m2a3r3j4Output = 1$
$m4m1a1j3m3m5j1InputOutput = 1$	$m4m1a1j3m3m5j4a1Output = 1$
$m4m1a1j3m3m5j4j1Output = 1$	$m4m1a1j3m3m5j4a4Output = 1$
$m4m1a1j3m3m5r3j1InputOutput = 1$	$m4m1a1j3m3m5r3j4Output = 1$
$m4m2j2m3m5j1InputOutput = 1$	$m4m2j2m3m5j4a1Output = 1$
$m4m2j2m3m5j4j1Output = 1$	$m4m2j2m3m5j4a4Output = 1$
$m4m2j2r3j1InputOutput = 1$	$m4m2j2r3j4Output = 1$
$m4j2j3m3m5j1InputOutput = 1$	$m4j2j3m3m5j4a1Output = 1$
$m4j2j3m3m5j4j1Output = 1$	$m4j2j3m3m5j4a4Output = 1$
$m4j2j3r3j1InputOutput = 1$	$m4j2j3r3j4Output = 1$
$x4m1a1m2a3m3m5j1InputOutput = 1$	$x4m1a1m2a3m3m5j4a1Output = 1$
$x4m1a1m2a3m3m5j4j1Output = 1$	$x4m1a1m2a3m3m5j4a4Output = 1$
$x4m1a1m2a3r3j1InputOutput = 1$	$x4m1a1m2a3r3j4Output = 1$
$x4m1a1j3m3m5j1InputOutput = 1$	$x4m1a1j3m3m5j4a1Output = 1$
$x4m1a1j3m3m5j4j1Output = 1$	$x4m1a1j3m3m5j4a4Output = 1$
$x4m1a1j3r3j1InputOutput = 1$	$x4m1a1j3r3j4Output = 1$

$$\begin{array}{l}
 \left\{ \begin{array}{l}
 x_{4m2j2m3m5j1} \text{InputOutput} = 1 \\
 x_{4m2j2m3m5j4j1} \text{Output} = 1 \\
 x_{4m2j2r3j1} \text{InputOutput} = 1
 \end{array} \right.
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{l}
 x_{4m2j2m3m5j4a1} \text{Output} = 1 \\
 x_{4m2j2m3m5j4a4} \text{Output} = 1 \\
 x_{4m2j2r3j4} \text{Output} = 1
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 \left\{ \begin{array}{l}
 x_{4j2j3m3m5j1} \text{InputOutput} = 1 \\
 x_{4j2j3m3m5j4j1} \text{Output} = 1 \\
 x_{4j2j3r3j1} \text{InputOutput} = 1
 \end{array} \right.
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{l}
 x_{4j2j3m3m5j4a1} \text{Output} = 1 \\
 x_{4j2j3m3m5j4a4} \text{Output} = 1 \\
 \boxed{x_{4j2j3r3j4} \text{Output} = 1}
 \end{array}$$

Pour le placement des capteurs, nous avons retenu le sous-ensemble encadré ci-dessus sauf le sommet Output (cf. Chapitre 3, paragraphe 2.3.2.1).

Sommaire

ANNEXE 1 : Placement des capteurs	169
ANNEXE 2 : Programme de simulation	174
ANNEXE 3 : Résultats de la Simulation de la gamme opératoire GO₁	199
Notations	200
Annexe 3.A : Données du fonctionnement normal	200
Annexe 3.B : Données du fonctionnement défaillant	202
1. M2 défaillante	202
2. M1 défaillante	204
3. M3 défaillante	206
ANNEXE 4 : Résultats de la Simulation des trois gammes opératoires GO₁, GO₂ et GO₃	209
Notations	210
Annexe 4.A : Fonctionnement normal	210
1. Gamme GO ₁	210
2. Gamme GO ₂	211
3. Gamme GO ₃	212
Annexe 4.B : Données du fonctionnement défaillant	213
1. M2 défaillante	213
1.1. Gamme GO ₁	213
1.2. Gamme GO ₂	214
1.3. Gamme GO ₃	214
2. M1 défaillante	215
2.1. Gamme GO ₁	215
2.2. Gamme GO ₂	216
2.3. Gamme GO ₃	216
ANNEXE 5 : Programme de traitement des fichiers de données Witness	218
ANNEXE 6 : Programme de diagnostic	221
Programme de diagnostic	222
Défaillance de la machine M1	226
Défaillance de la machine M2	239
ANNEXE 7 : Diagnostic hors-ligne pour identifier l'origine d'une dérive du flux ou de la qualité	252
ANNEXE 8 : le contrôle qualité	257
1. Le contrôle qualité : définition	258
2. Les outils de contrôle qualité [Bajic 88]	259
3. Exploitation du contrôle qualité	261

ANNEXE 1 : Placement des capteurs

Méthode de Maghout

Soit $G = (X, \Gamma)$ un graphe orienté tel que :

$X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ est l'ensemble des sommets du graphe et Γ une application définie par :

$$\begin{aligned} \Gamma : X &\rightarrow P(X) \\ X_i &\rightarrow \Gamma\{X_i\} \end{aligned}$$

où $\Gamma\{X_i\}$ est l'ensemble des successeurs de X_i (i.e. $\forall X_j \in \Gamma\{X_i\}, \exists$ un arc orienté de X_i à X_j noté u_{ij}).

Un ensemble $T (\subset X)$ est dit "extérieurement stable" si pour chaque sommet $X_i \notin T$, nous avons :

$$\Gamma\{X_i\} \cap T \neq \emptyset \quad (1)$$

En d'autres termes, chaque sommet $X_i \notin T$ est relié à au moins un sommet $X_j \in T$ par un arc qui a son origine dans l'ensemble $(X - T)$.

L'équation (1) peut alors s'écrire :

$$\forall X_i \in X, [\{X_i\} \cup \Gamma\{X_i\}] \cap T \neq \emptyset \quad (2)$$

ou encore :

$$\forall X_i \in X, (X_i \in T \text{ ou } (\exists X_j / X_j \in T \text{ et } X_j \in \Gamma\{X_i\})) \quad (3) \quad \text{est vraie}$$

Nous définissons la projection p_T :

$$\begin{aligned} X &\rightarrow \{0, 1\} \\ X_i &\rightarrow x_i \quad / \quad \begin{aligned} x_i &= 1 \text{ si } X_i \in T \\ x_i &= 0 \text{ si } X_i \notin T \end{aligned} \end{aligned}$$

et $p_{\Gamma\{X_i\}}$ la projection :

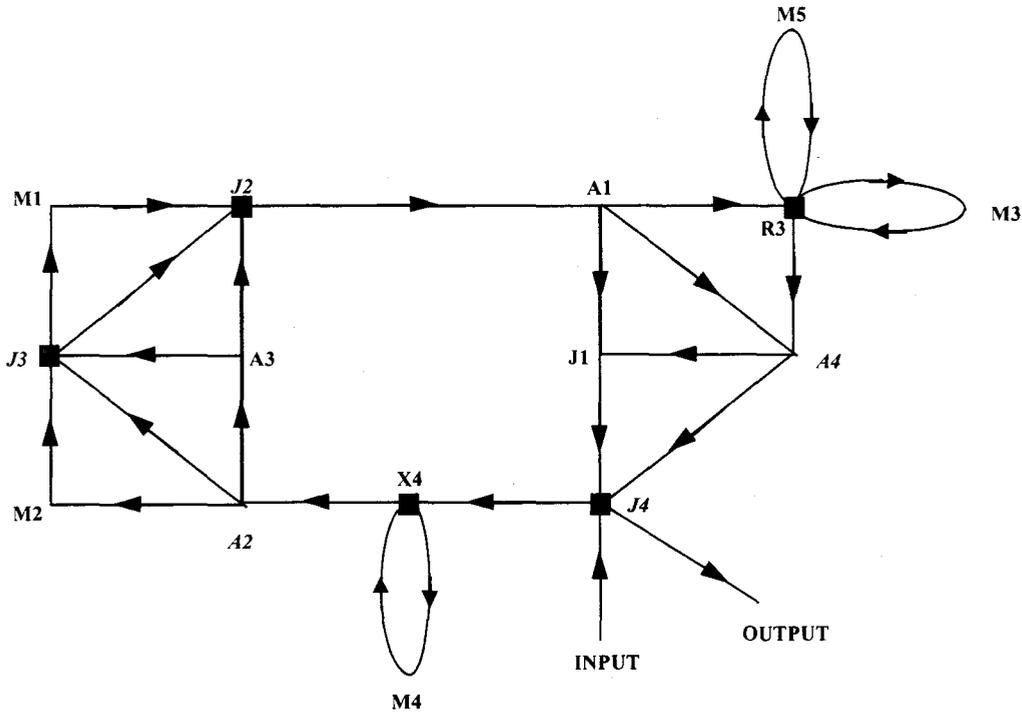
$$\begin{aligned} X &\rightarrow \{0, 1\} \\ X_j &\rightarrow \alpha_{ij} \quad / \quad \begin{aligned} \alpha_{ij} &= 1 \text{ si } X_j \in \Gamma\{X_i\} \\ \alpha_{ij} &= 0 \text{ si } X_j \notin \Gamma\{X_i\} \end{aligned} \end{aligned}$$

La relation (1) devient :

$$\dot{\prod}_i (x_i + \dot{\sum}_j \alpha_{ij} x_j) = 1 \quad (4)$$

$\dot{\prod}$ et $\dot{\sum}$ sont respectivement la multiplication et l'addition booléennes.

Considérons le graphe ci-dessous équivalent au système de production étudié.



L'équation (4) appliquée à l'ensemble des sommets du graphe donne :

$$(m1 + j2)(m2 + j3)(m3 + r3)(m4 + x4)(m5 + r3)(j1 + j4)(j2 + a1)(j3 + m1 + j2)(j4 + x4 + Output)(a1 + r3 + j1 + a4) \\ (a2 + a3 + m2 + j3)(a3 + j2 + j3)(a4 + j1 + j4)(Input + j4)(x4 + a2 + m4)(r3 + m3 + m5 + a4)Output = 1$$

$$\Leftrightarrow (m1 + j2)(j2 + a1)(m2 + j3)(a3 + j2 + j3)(m3 + r3)(m5 + r3)(a1 + r3 + j1 + a4) \\ (Input + j4)(j1 + j4)(m4 + x4)Output = 1$$

$$\Leftrightarrow [m1(j2 + a1) + j2][m2(a3 + j2 + j3) + j3][(m3m5 + r3)(a1 + r3 + j1 + a4)][Input(j1 + j4) + j4][m4 + x4]Output = 1$$

$$\Leftrightarrow (m1a1 + j2)(m2a3 + m2j2 + j3)(m3m5 + r3)(a1 + r3 + j1 + a4)(Inputj1 + j4)(m4 + x4)Output = 1$$

$$\Leftrightarrow (m1a1m2a3 + m1a1m2j2 + m1a1j3 + j2m2a3 + m2j2 + j2j3)(m3m5 + r3)(m4 + x4) \\ (Inputj1a1 + Inputj1r3 + Inputj1 + Inputj1a4 + j4a1 + j4r3 + j4j1 + j4a4)Output = 1$$

$$\Leftrightarrow (m1a1m2a3 + m1a1j3 + m2j2 + j2j3)(m3m5 + r3)(Inputj1 + j4a1 + j4r3 + j4j1 + j4a4)(m4 + x4)Output = 1$$

$$\Leftrightarrow (m4m1a1m2a3 + m4m1a1j3 + m4m2j2 + m4j2j3 + x4m1a1m2a3 + x4m1a1j3 + x4m2j2 + x4j2j3)Output \\ (m3m5j1Input + m3m5j4a1 + m3m5j4r3 + m3m5j4j1 + m3m5j4a4 + r3j1Input + r3j4a1 + r3j4 + r3j1j4 + r3j4a4) = 1$$

$$\Leftrightarrow (m4m1a1m2a3 + m4m1a1j3 + m4m2j2 + m4j2j3 + x4m1a1m2a3 + x4m1a1j3 + x4m2j2 + x4j2j3)Output \\ (m3m5j1Input + m3m5j4a1 + m3m5j4j1 + m3m5j4a4 + r3j1Input + r3j4) = 1$$

Nous obtenons après développement les 48 sous-ensembles suivants :

$m4m1a1m2a3m3m5j1InputOutput = 1$	$m4m1a1m2a3m3m5j4a1Output = 1$
$m4m1a1m2a3m3m5j4j1Output = 1$	$m4m1a1m2a3m3m5j4a4Output = 1$
$m4m1a1m2a3r3j1InputOutput = 1$	$m4m1a1m2a3r3j4Output = 1$
$m4m1a1j3m3m5j1InputOutput = 1$	$m4m1a1j3m3m5j4a1Output = 1$
$m4m1a1j3m3m5j4j1Output = 1$	$m4m1a1j3m3m5j4a4Output = 1$
$m4m1a1j3m3m5r3j1InputOutput = 1$	$m4m1a1j3m3m5r3j4Output = 1$
$m4m2j2m3m5j1InputOutput = 1$	$m4m2j2m3m5j4a1Output = 1$
$m4m2j2m3m5j4j1Output = 1$	$m4m2j2m3m5j4a4Output = 1$
$m4m2j2r3j1InputOutput = 1$	$m4m2j2r3j4Output = 1$
$m4j2j3m3m5j1InputOutput = 1$	$m4j2j3m3m5j4a1Output = 1$
$m4j2j3m3m5j4j1Output = 1$	$m4j2j3m3m5j4a4Output = 1$
$m4j2j3r3j1InputOutput = 1$	$m4j2j3r3j4Output = 1$
$x4m1a1m2a3m3m5j1InputOutput = 1$	$x4m1a1m2a3m3m5j4a1Output = 1$
$x4m1a1m2a3m3m5j4j1Output = 1$	$x4m1a1m2a3m3m5j4a4Output = 1$
$x4m1a1m2a3r3j1InputOutput = 1$	$x4m1a1m2a3r3j4Output = 1$
$x4m1a1j3m3m5j1InputOutput = 1$	$x4m1a1j3m3m5j4a1Output = 1$
$x4m1a1j3m3m5j4j1Output = 1$	$x4m1a1j3m3m5j4a4Output = 1$
$x4m1a1j3r3j1InputOutput = 1$	$x4m1a1j3r3j4Output = 1$

$$\begin{array}{l}
 \left[\begin{array}{l}
 x_{4m2j2m3m5j1} \text{InputOutput} = 1 \\
 x_{4m2j2m3m5j4j1} \text{Output} = 1 \\
 x_{4m2j2r3j1} \text{InputOutput} = 1
 \end{array} \right. \qquad \begin{array}{l}
 x_{4m2j2m3m5j4a1} \text{Output} = 1 \\
 x_{4m2j2m3m5j4a4} \text{Output} = 1 \\
 x_{4m2j2r3j4} \text{Output} = 1
 \end{array} \\
 \\
 \left[\begin{array}{l}
 x_{4j2j3m3m5j1} \text{InputOutput} = 1 \\
 x_{4j2j3m3m5j4j1} \text{Output} = 1 \\
 x_{4j2j3r3j1} \text{InputOutput} = 1
 \end{array} \right. \qquad \begin{array}{l}
 x_{4j2j3m3m5j4a1} \text{Output} = 1 \\
 x_{4j2j3m3m5j4a4} \text{Output} = 1 \\
 \boxed{x_{4j2j3r3j4} \text{Output} = 1}
 \end{array}
 \end{array}$$

Pour le placement des capteurs, nous avons retenu le sous-ensemble encadré ci-dessus sauf le sommet Output (cf. Chapitre 3, paragraphe 2.3.2.1).

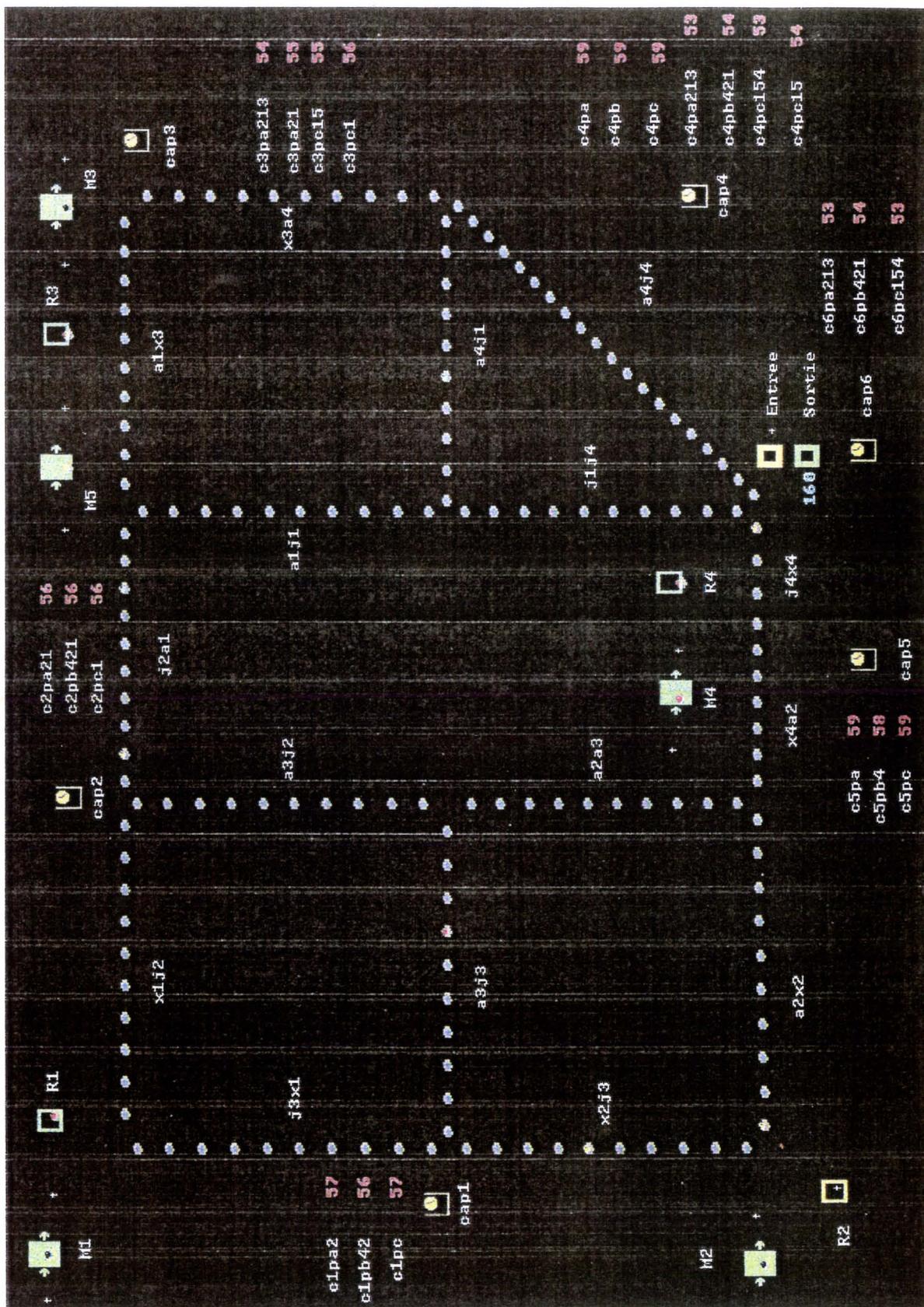
ANNEXE 2 : Programme de simulation

Notations :

- Les stocks Entree et Sortie de la simulation correspondent aux stocks INPUT et OUTPUT dans le Chapitre 3.
- Les sommets X1, X2, X3 et X4 des convoyeurs correspondent respectivement aux ressources M1, M2, R3 et P4 sur la modélisation par le graphe (Chapitre 3, paragraphe 2.3.2.1)

Insérer ici le schéma de simulation

SCHEMA DE SIMULATION



! MODELE WITNESS: normal

□

* Titre : simulation

□

* Auteur : Fatime LY* Date : Mer Décembre 16

13:42:35 1998

□

* Version: WIN-307 Release

6.10

□

Partie déclaration**DECLARER**

ARTICLE: PA, Attributs Variable;
 ARTICLE: PB, Attributs Variable;
 ARTICLE: PC, Attributs Variable;
 STOCK: Entree,1,30000;
 STOCK: Sortie,1,30000;
 MACHINE: M1,1,Simple,0,0;
 MACHINE: M2,1,Simple,0,0;
 MACHINE: M3,1,Simple,0,0;
 MACHINE: M4,1,Simple,0,0;
 MACHINE: M5,1,Simple,0,0;
 MACHINE: R1,1,Simple,0,0;
 MACHINE: R2,1,Simple,0,0;
 MACHINE: R3,1,Simple,0,0;
 MACHINE: R4,1,Simple,0,0;
 CONVOYEUR:
 a2x2,1,A_accumulation,10;
 CONVOYEUR:
 x2j3,1,A_accumulation,10;
 CONVOYEUR:
 j3x1,1,A_accumulation,10;
 CONVOYEUR:
 x1j2,1,A_accumulation,10;
 CONVOYEUR:
 j2a1,1,A_accumulation,10;
 CONVOYEUR:
 a1x3,1,A_accumulation,10;
 CONVOYEUR:
 x3a4,1,A_accumulation,10;
 CONVOYEUR:
 a4j4,1,A_accumulation,20;
 CONVOYEUR: j4x4,1,A_accumulation,3;
 CONVOYEUR: x4a2,1,A_accumulation,7;
 CONVOYEUR:
 a2a3,1,A_accumulation,10;
 CONVOYEUR:
 a3j3,1,A_accumulation,10;

CONVOYEUR:
 a3j2,1,A_accumulation,10;
 CONVOYEUR:
 a1j1,1,A_accumulation,10;
 CONVOYEUR:
 j1j4,1,A_accumulation,10;
 CONVOYEUR:
 a4j1,1,A_accumulation,10;
 ATTRIBUT: numpa,1,Entier,1;
 ATTRIBUT: numpb,1,Entier,2;
 ATTRIBUT: numpc,1,Entier,3;
 MACHINE: cap1,1,Simple,0,0;
 MACHINE: cap2,1,Simple,0,0;
 MACHINE: cap3,1,Simple,0,0;
 MACHINE: cap4,1,Simple,0,0;
 MACHINE: cap5,1,Simple,0,0;
 MACHINE: cap6,1,Simple,0,0;
 STOCK: enm1,1,1;
 STOCK: sorm1,1,1;
 STOCK: enm2,1,1;
 STOCK: sorm2,1,1;
 STOCK: enm3,1,1;
 STOCK: sorm3,1,1;
 STOCK: enm4,1,1;
 STOCK: sorm4,1,1;
 STOCK: enm5,1,1;
 STOCK: sorm5,1,1;
 VARIABLE: nbsortie,1,1,Entier;
 VARIABLE: c1pa2,1,1,Entier;
 VARIABLE: c1pb42,1,1,Entier;
 VARIABLE: c1pc,1,1,Entier;
 VARIABLE: c1a,1,1,Entier;
 VARIABLE: c1b,1,1,Entier;
 VARIABLE: c1c,1,1,Entier;
 VARIABLE: c2pa21,1,1,Entier;
 VARIABLE: c2pb421,1,1,Entier;
 VARIABLE: c2pc1,1,1,Entier;
 VARIABLE: c2a,1,1,Entier;
 VARIABLE: c2b,1,1,Entier;
 VARIABLE: c2c,1,1,Entier;
 VARIABLE: c3pa213,1,1,Entier;
 VARIABLE: c2pa21,1,1,Entier;
 VARIABLE: c3pc15,1,1,Entier;
 VARIABLE: c3pc1,1,1,Entier;
 VARIABLE: c3a1,1,1,Entier;
 VARIABLE: c3a2,1,1,Entier;
 VARIABLE: c3c15,1,1,Entier;
 VARIABLE: c3c1,1,1,Entier;
 VARIABLE: c4pa,1,1,Entier;
 VARIABLE: c4pb,1,1,Entier;
 VARIABLE: c4pc,1,1,Entier;
 VARIABLE: c4pa213,1,1,Entier;
 VARIABLE: c4pb421,1,1,Entier;
 VARIABLE: c4pc154,1,1,Entier;
 VARIABLE: c4pb42,1,1,Entier;
 VARIABLE: c4pc15,1,1,Entier;
 VARIABLE: c4a,1,1,Entier;
 VARIABLE: c4a1,1,1,Entier;
 VARIABLE: c4b,1,1,Entier;
 VARIABLE: c4b1,1,1,Entier;

```

VARIABLE: c4c,1,1,Entier;
VARIABLE: c4c15,1,1,Entier;
VARIABLE: c4c2,1,1,Entier;
VARIABLE: c5pa,1,1,Entier;
VARIABLE: c5a,1,1,Entier;
VARIABLE: c5pb4,1,1,Entier;
VARIABLE: c5b,1,1,Entier;
VARIABLE: c5pc,1,1,Entier;
VARIABLE: c5c,1,1,Entier;
VARIABLE: c6pa213,1,1,Entier;
VARIABLE: c6a,1,1,Entier;
VARIABLE: c6pb421,1,1,Entier;
VARIABLE: c6b,1,1,Entier;
VARIABLE: c6pc154,1,1,Entier;
VARIABLE: c6c15,1,1,Entier;
VARIABLE: fea1,1,1, Reel;
VARIABLE: fsa1,1,1, Reel;
VARIABLE: feb1,1,1, Reel;
VARIABLE: fsb1,1,1, Reel;
VARIABLE: fec1,1,1, Reel;
VARIABLE: fsc1,1,1, Reel;
VARIABLE: fea2,1,1, Reel;
VARIABLE: fsa2,1,1, Reel;
VARIABLE: feb2,1,1, Reel;
VARIABLE: fsb2,1,1, Reel;
VARIABLE: fec2,1,1, Reel;
VARIABLE: fsc2,1,1, Reel;
VARIABLE: fea3,1,1, Reel;
VARIABLE: fsa3,1,1, Reel;
VARIABLE: feb3,1,1, Reel;
VARIABLE: fsb3,1,1, Reel;
VARIABLE: fec3,1,1, Reel;
VARIABLE: fsc3,1,1, Reel;
VARIABLE: fea4,1,1, Reel;
VARIABLE: fsa4,1,1, Reel;
VARIABLE: feb4,1,1, Reel;
VARIABLE: fsb4,1,1, Reel;
VARIABLE: fec4,1,1, Reel;
VARIABLE: fsc4,1,1, Reel;
VARIABLE: fea5,1,1, Reel;
VARIABLE: fsa5,1,1, Reel;
VARIABLE: fec5,1,1, Reel;
VARIABLE: fsc5,1,1, Reel;
VARIABLE: fec6,1,1, Reel;
VARIABLE: fsc6,1,1, Reel;
COURBE: derivea,1;
COURBE: deriveb,1;
COURBE: derivec,1;
COURBE: derivem1,1;
COURBE: derivem2,1;
COURBE: derivem3,1;
COURBE: derivem4,1;
COURBE: derivem5,1;
VARIABLE: alpham1a,1,1, Reel;
VARIABLE: alpham1b,1,1, Reel;
VARIABLE: alpham1c,1,1, Reel;
VARIABLE: alpham2a,1,1, Reel;
VARIABLE: alpham2b,1,1, Reel;
VARIABLE: alpham3a,1,1, Reel;
VARIABLE: alpham4b,1,1, Reel;
VARIABLE: alpham4c,1,1, Reel;
VARIABLE: alpham5c,1,1, Reel;
VARIABLE: XA1,1,1, Reel;
VARIABLE: XA2,1,1, Reel;
VARIABLE: XA3,1,1, Reel;
VARIABLE: XA4,1,1, Reel;
VARIABLE: XA5,1,1, Reel;
VARIABLE: XB1,1,1, Reel;
VARIABLE: XB2,1,1, Reel;
VARIABLE: XB3,1,1, Reel;
VARIABLE: XB4,1,1, Reel;
VARIABLE: XC1,1,1, Reel;
VARIABLE: XC2,1,1, Reel;
VARIABLE: XC3,1,1, Reel;
VARIABLE: XC4,1,1, Reel;
VARIABLE: XC5,1,1, Reel;
VARIABLE: XC6,1,1, Reel;
VARIABLE: reell1a,1,1, Reel;
VARIABLE: reell2a,1,1, Reel;
VARIABLE: reell3a,1,1, Reel;
VARIABLE: reell4a,1,1, Reel;
VARIABLE: reell5a,1,1, Reel;
VARIABLE: reell1b,1,1, Reel;
VARIABLE: reell2b,1,1, Reel;
VARIABLE: reell3b,1,1, Reel;
VARIABLE: reell4b,1,1, Reel;
VARIABLE: reell1c,1,1, Reel;
VARIABLE: reell2c,1,1, Reel;
VARIABLE: reell3c,1,1, Reel;
VARIABLE: reell4c,1,1, Reel;
VARIABLE: reell5c,1,1, Reel;
VARIABLE: reell6c,1,1, Reel;
VARIABLE: m1cycle,1,1, Reel;
VARIABLE: m2cycle,1,1, Reel;
VARIABLE: m3cycle,1,1, Reel;
FICHIER: degradea, Ecriture;
FICHIER: degradeb, Ecriture;
FICHIER: degradec, Ecriture;
PLANNING: horizon, General
planning;
PLANNING: sature,General planning;
PLANNING: tcyclem1, General
planning;
PLANNING: tcyclem2, General
planning;
PLANNING: tcyclem3, General
planning;
VARIABLE: x1,1,1, Reel;
VARIABLE: x2,1,1, Reel;
VARIABLE: x3,1,1, Reel;

```

FIN DECLARER**# Partie Description****DECRIRE**

SELECTION

PA

NOM DE L'ARTICLE: PA;
 TYPE: Attributs Variable;
 NUMERO GROUPE: 1;
 ARRIVEES MAXIMUM: 10000;
 TEMPS ENTRE ARRIVEES:
 11.0 pour GO₁
 31.0 pour GO₁, GO₂ et GO₃;
 PREMIERE ARRIVEE A: 0.0;
 TAILLE DE LOT: 1;
 ACTIONS, Creation
 Debut
 numpa = 0
 Fin Actions
 LOI DE SORTIE: PUSH to Entree;
 ROUTAGE D'ARTICLES: Aucun
 RAPPORT: Oui;
 CONTENANCE FLUIDES: Non;
 PLANNING: Indefini;
FIN PA

PB

NOM DE L'ARTICLE: PB;
 TYPE: Attributs Variable;
 NUMERO GROUPE: 2;
 ARRIVEES MAXIMUM: 10000;
 TEMPS ENTRE ARRIVEES:
 11.0 pour GO₁
 31.0 pour GO₁, GO₂ et GO₃;
 PREMIERE ARRIVEE A: 0.0;
 TAILLE DE LOT: 1;
 ACTIONS, Creation
 Debut
 numpb = 0
 Fin Actions
 LOI DE SORTIE: PUSH to Entree;
 ROUTAGE D'ARTICLES: Aucun
 RAPPORT: Oui;
 CONTENANCE FLUIDES: Non;
 PLANNING: Indefini;
FIN PB

PC

NOM DE L'ARTICLE: PC;
 TYPE: Attributs Variable;
 NUMERO GROUPE: 3;
 ARRIVEES MAXIMUM: 10000;
 TEMPS ENTRE ARRIVEES:
 11.0 pour GO₁
 31.0 pour GO₁, GO₂ et GO₃;
 PREMIERE ARRIVEE A: 0.0;
 TAILLE DE LOT: 1;
 ACTIONS, Creation
 Debut
 numpc = 0
 Fin Actions
 LOI DE SORTIE: PUSH to Entree;
 ROUTAGE D'ARTICLES: Aucun
 RAPPORT: Oui;

CONTENANCE FLUIDES: Non;
 PLANNING: Indefini;
FIN PC

Entree

NOM DU STOCK: Entree;
 QUANTITE: 1;
 CAPACITE: 30000;
 SEJOUR MINIMUM : Indefini;
 POSITION ENTREE: Arriere;
 CHERCHER A PARTIR DE: Avant;
 * Selection: Premier;
 RAPPORT: Individuel;
 PLANNING: Indefini,0;
FIN Entree

Sortie

NOM DU STOCK: Sortie;
 QUANTITE: 1;
 CAPACITE: 30000;
 SEJOUR MINIMUM : Indefini;
 POSITION ENTREE: Arriere;
 CHERCHER A PARTIR DE: Avant;
 * Selection: Premier;
 ACTIONS, Entree
 Debut
 nbsortie = nbsortie + 1
 IF TYPE = PA
 c6pa213 = c6pa213 + 1
 ELSE
 IF TYPE = PB
 c6pb421 = c6pb421 + 1
 ELSE
 c6pc154 = c6pc154 + 1
 ENDIF
 ENDIF
 RAPPORT: Individuel;
 PLANNING: Indefini,0;
FIN Sortie

M1

NOM DE LA MACHINE: M1;
 QUANTITE: 1;
 TYPE: Simple;
 PRIORITE: Indefini;
 RESSOURCE:
 Reparation: Aucun;
 FIN
 RESSOURCE:
 Cycle: Aucun;
 FIN
 LIENS DISCRETS :
 Remplir: Aucun
 FIN
 LIENS DISCRETS :
 Vider: Aucun
 FIN
 TEMPS DE CYCLE:

```

10.0 pour GO1
9.0 pour GO1, GO2 et GO3;
PANNES: Aucune;
ACTIONS, Fin
Debut
  IF TYPE = PC
    numpc = 1
  ELSE
    IF TYPE = PB
      numpb = 421
    ELSE
      numpa = 21
    ENDIF
  ENDIF
Fin Actions
LOI D'ENTREE: PULL from enm1;
LOI DE SORTIE: PUSH to sorm1;
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini,0,0;
FIN M1

```

M2

```

NOM DE LA MACHINE: M2;
QUANTITE: 1;
TYPE: Simple;
PRIORITE: Indefini;
RESSOURCE:
  Reparation: Aucun;
FIN
RESSOURCE:
  Cycle: Aucun;
FIN
LIENS DISCRETS :
  Remplir: Aucun
FIN
LIENS DISCRETS :
  Vider: Aucun

```

```

FIN
TEMPS DE CYCLE:
10.0 pour GO1
15.0 pour GO1, GO2 et GO3;
PANNES: Aucune;
ACTIONS, Fin
Debut
  IF TYPE = PA
    numpa = 2
  ELSE
    numpb = 42
  ENDIF
Fin Actions
LOI D'ENTREE: PULL from enm2;
LOI DE SORTIE: PUSH to sorm2;
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini,0,0;
FIN M2

```

M3

```

NOM DE LA MACHINE: M3;
QUANTITE: 1;

```

```

TYPE: Simple;
PRIORITE: Indefini;
RESSOURCE:
  Reparation: Aucun;
FIN
RESSOURCE:
  Cycle: Aucun;
FIN
LIENS DISCRETS :
  Remplir: Aucun
FIN
LIENS DISCRETS :
  Vider: Aucun
FIN
TEMPS DE CYCLE:
10.0 pour GO1
27.0 pour GO1, GO2 et GO3;
PANNES: Aucune;
ACTIONS, Fin
Debut

```

```

  IF TYPE = PA
    numpa = 213
  ELSE
    numpc = 13
  ENDIF

```

```

Fin Actions
LOI D'ENTREE: PULL from enm3;
LOI DE SORTIE: PUSH to sorm3;
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini,0,0;
FIN M3

```

M4

```

NOM DE LA MACHINE: M4;
QUANTITE: 1;
TYPE: Simple;
PRIORITE: Indefini;
RESSOURCE:
  Reparation: Aucun;
FIN
RESSOURCE:
  Cycle: Aucun;
FIN
LIENS DISCRETS :
  Remplir: Aucun
FIN
LIENS DISCRETS :
  Vider: Aucun
FIN
TEMPS DE CYCLE:
15.0 pour GO1, GO2 et GO3;
PANNES: Aucune;
ACTIONS, Fin
Debut
  IF TYPE = PB
    numpb = 4
  ELSE
    IF numpc = 15
      numpc = 154
    ENDIF

```

```

ENDIF
Fin Actions
LOI D'ENTREE: PULL from enm4;
LOI DE SORTIE: PUSH to sorm4;
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini,0,0;
FIN M4

M5
NOM DE LA MACHINE: M5;
QUANTITE: 1;
TYPE: Simple;
PRIORITE: Indefini;
RESSOURCE:
  Reparation: Aucun;
FIN
RESSOURCE:
  Cycle: Aucun;
FIN
LIENS DISCRETS :
  Remplir: Aucun
FIN
LIENS DISCRETS :
  Vider: Aucun
FIN
TEMPS DE CYCLE:
27.0 pour GO1, GO2 et GO3;
PANNES: Aucune;
LOI D'ENTREE: PULL from enm5;
LOI DE SORTIE: PUSH to sorm5;
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini,0,0;
FIN M5

R1
NOM DE LA MACHINE: R1;
QUANTITE: 1;
TYPE: Simple;
PRIORITE: Indefini;
RESSOURCE:
  Reparation: Aucun;
FIN
RESSOURCE:
  Cycle: Aucun;
FIN
LIENS DISCRETS :
  Remplir: Aucun
FIN
LIENS DISCRETS :
  Vider: Aucun
FIN
TEMPS DE CYCLE: 2.7;
PANNES: Aucune;
LOI D'ENTREE: IF NFREE (enm1) = 1
AND NOCC (j3x1,0,5) > 0
  PULL from j3x1 at
Front
ELSE
  PULL from M1

```

```

ENDIF;
LOI DE SORTIE: IF TYPE = PC
  IF numpc = 1
    PUSH to x1j2 at Rear
  ELSE
    PUSH to enm1
  ENDIF
ELSE
  IF TYPE = PB
    IF numpb = 421
      PUSH to x1j2 at
Rear
    ELSE
      PUSH to enm1
    ENDIF
  ELSE
    IF numpa = 21
      PUSH to x1j2 at
Rear
    ELSE
      PUSH to enm1
    ENDIF
  ENDIF;
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini,0,0;
FIN R1

R2
NOM DE LA MACHINE: R2;
QUANTITE: 1;
TYPE: Simple;
PRIORITE: 2;
RESSOURCE:
  Reparation: Aucun;
FIN
RESSOURCE:
  Cycle: Aucun;
FIN
LIENS DISCRETS :
  Remplir: Aucun
FIN
LIENS DISCRETS :
  Vider: Aucun
FIN
TEMPS DE CYCLE: 3.75;
PANNES: Aucune;
LOI D'ENTREE: IF NFREE (enm2) = 1
AND NOCC (a2x2,0,5) > 0
  PULL from a2x2 at
Front
ELSE
  PULL from sorm2
ENDIF;
LOI DE SORTIE: IF TYPE = PA
  IF numpa = 2
    PUSH to x2j3 at Rear
  ELSE
    PUSH to enm2
  ENDIF

```

```

ELSE
  IF numpb = 42
    PUSH to x2j3 at Rear
  ELSE
    PUSH to enm2
  ENDIF
ENDIF;
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini,0,0;
FIN R2

R3
NOM DE LA MACHINE: R3;
QUANTITE: 1;
TYPE: Simple;
PRIORITE: Indefini;
RESSOURCE:
  Reparation: Aucun;
FIN
RESSOURCE:
  Cycle: Aucun;
FIN
LIENS DISCRETS :
  Remplir: Aucun
FIN
LIENS DISCRETS :
  Vider: Aucun
FIN
TEMPS DE CYCLE: 5.0;
PANNES: Aucune;
LOI D'ENTREE: IF NFREE (enm3) = 1
AND NOCC (alx3,1,1) > 0 AND alx3:TYPE
<> PC
  Front
    PULL from alx3 at
  ELSE
    IF NFREE (enm5) = 1
    AND NOCC (alx3,1,1) > 0 AND alx3:TYPE
    = PC
      Front
        PULL from alx3 at
    ELSE
      IF NFREE (sorm3) = 0
        PULL from sorm3
      ELSE
        PULL from sorm5
      ENDIF
    ENDIF
  ENDIF;
LOI DE SORTIE: IF TYPE = PA
  IF numpa = 213
    PUSH to x3a4 at Rear
  ELSE
    PUSH to enM3
  ENDIF
ELSE
  IF numpc = 1
    IF NFREE (enm5) = 1
      PUSH to enm5
    ENDIF

```

```

ELSE
  PUSH to x3a4 at Rear
ENDIF;
ENDIF;
ACTIONS, Fin
Debut
  IF Type = PA
    IF numpa = 21
      C3pa21 = c3pa21 + 1
    ESLEIF numpa = 213
      C3pa213 = c3pa213 + 1
    ENDIF
  ELSEIF TYPE = PC
    IF numpc = 15
      C3pc15 = c3pc15 + 1
    ELSEIF numpc = 1
      C3pc1 = c3pc1 + 1
    ENDIF
  ENDIF
Fin ;
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini,0,0;
FIN R3

```

```

R4
NOM DE LA MACHINE: R4;
NOTES:
  La sortie des pieces est
  privilegiee par rapport a l'entree
FIN NOTES
QUANTITE: 1;
TYPE: Simple;
PRIORITE: 3;
RESSOURCE:
  Reparation: Aucun;
FIN
RESSOURCE:
  Cycle: Aucun;
FIN
LIENS DISCRETS :
  Remplir: Aucun
FIN
LIENS DISCRETS :
  Vider: Aucun
FIN
TEMPS DE CYCLE: 1.65;
PANNES: Aucune;
LOI D'ENTREE: IF NFREE (enm4) = 1
AND (NOCC (a4j4,0,1) > 0 OR (NPARTS
(Entree) <> 0 AND Entree:TYPE = PB))
  IF NOCC (a4j4,0,3) > 1
    PULL from a4j4 at
  Front
    ELSE
      IF NPARTS (Entree) <>
0 AND Entree:TYPE = PB
        PULL from Entree
      ELSE
        PULL from a4j4 at
    Front

```

```

                ENDIF
            ENDIF
        ELSE
            IF NPARTS (sorm4) = 1
                PULL from sorm4
            ELSE
                IF NOCC (j4x4,0,0) >
2
                    PULL from j4x4 at
Front
                ELSE
                    IF NPARTS (Entree)
<> 0 AND Entree:TYPE <> PB
                        PULL from Entree
                    ELSE
                        PULL from j4x4 at
Front
                    ENDIF
                ENDIF
            ENDIF;
        LOI DE SORTIE: IF TYPE = PB
            IF numpb = 421
                PUSH to Sortie
            ELSE
                IF numpb = 4
                    PUSH to x4a2 at
Rear
                ELSE
                    PUSH to enm4
                ENDIF
            ENDIF
        ELSE
            IF TYPE = PC
                IF numpc = 15 OR
numpc = 13
                    PUSH to enm4
                ELSE
                    IF numpc = 0
                        PUSH to x4a2 at
Rear
                    ELSE
                        PUSH to Sortie
                    ENDIF
                ENDIF
            ELSE
                IF numpa = 0
                    PUSH to x4a2 at
Rear
                ELSE
                    PUSH to Sortie
                ENDIF
            ENDIF
        ENDIF;
    ACTIONS, Fin
    Debut
        IF TYPE = PA
            IF numpa = 0
                C4pa = c4pa + 1
            ELSEIF numpa = 213
                C4pa213 = c4pa213 + 1

```

```

                ENDIF
            ELSEIF TYPE = PB
                IF numpb = 0
                    C4pb = c4pb + 1
                ELSEIF numpb = 421
                    C4pb421 = c4pb421 + 1
                ENDIF
            ELSEIF TYPE = PC
                IF numpc = 0
                    C4pc = c4pc + 1
                ELSEIF numpc = 15
                    C4pc15 = c4pc15 + 1
                ELSEIF numpc = 154
                    C4pc154 = c4pc154 + 1
                ENDIF
            ENDIF
        Fin Actions;
        RAPPORT: Individuel;
        PLANNING: Indefini,0,0;
FIN R4

a2x2
    NOM DU CONVOYEUR: a2x2;
    QUANTITE: 1;
    TYPE: A_accumulation;
    LONGUEUR ART.: 10;
    CAPACITE MAX: 10;
    LOI D'ENTREE: Wait;
    LOI DE SORTIE: Wait;
    TEMPS DE CYCLE: 1.0;
    PANNES: Aucune;
    PRIORITE: 1;
    RESSOURCE:
        Reparation: Aucun;
    FIN
    RAPPORT: Individuel;
    PLANNING: Indefini;
FIN a2x2

x2j3
    NOM DU CONVOYEUR: x2j3;
    QUANTITE: 1;
    TYPE: A_accumulation;
    LONGUEUR ART.: 10;
    CAPACITE MAX: 10;
    LOI D'ENTREE: Wait;
    LOI DE SORTIE: push to cap1;
    TEMPS DE CYCLE: 1.4;
    PANNES: Aucune;
    PRIORITE: 2;
    RESSOURCE:
        Reparation: Aucun;
    FIN
    RAPPORT: Individuel;
    PLANNING: Indefini;
FIN x2j3

j3x1

```

NOM DU CONVOYEUR: j3x1;
 QUANTITE: 1;
 TYPE: A_accumulation;
 LONGUEUR ART.: 10;
 CAPACITE MAX: 10;
 LOI D'ENTREE: Wait;
 LOI DE SORTIE: Wait;
 TEMPS DE CYCLE: 0.35;
 PANNES: Aucune;
 PRIORITE: Indefini;
 RESSOURCE:
 Reparation: Aucun;
 FIN
 RAPPORT: Individuel;
 PLANNING: Indefini;
FIN j3x1

x1j2

NOM DU CONVOYEUR: x1j2;
 QUANTITE: 1;
 TYPE: A_accumulation;
 LONGUEUR ART.: 10;
 CAPACITE MAX: 10;
 LOI D'ENTREE: Wait;
 LOI DE SORTIE: Wait;
 TEMPS DE CYCLE: 0.6;
 PANNES: Aucune;
 PRIORITE: Indefini;
 RESSOURCE:
 Reparation: Aucun;
 FIN
 RAPPORT: Individuel;
 PLANNING: Indefini;
FIN x1j2

j2a1

NOM DU CONVOYEUR: j2a1;
 QUANTITE: 1;
 TYPE: A_accumulation;
 LONGUEUR ART.: 10;
 CAPACITE MAX: 10;
 LOI D'ENTREE: Wait;
 LOI DE SORTIE: IF TYPE = PB
 PUSH to alj1 at Rear
 ELSE
 PUSH to alx3 at Rear
 ENDIF;
 TEMPS DE CYCLE: 1.3;
 PANNES: Aucune;
 PRIORITE: Indefini;
 RESSOURCE:
 Reparation: Aucun;
 FIN
 RAPPORT: Individuel;
 PLANNING: Indefini;
FIN j2a1

alx3

NOM DU CONVOYEUR: alx3;
 QUANTITE: 1;
 TYPE: A_accumulation;
 LONGUEUR ART.: 10;
 CAPACITE MAX: 10;
 LOI D'ENTREE: Wait;
 LOI DE SORTIE: Wait;
 TEMPS DE CYCLE: 0.5;
 PANNES: Aucune;
 PRIORITE: Indefini;
 RESSOURCE:
 Reparation: Aucun;
 FIN
 RAPPORT: Individuel;
 PLANNING: Indefini;
FIN alx3

x3a4

NOM DU CONVOYEUR: x3a4;
 QUANTITE: 1;
 TYPE: A_accumulation;
 LONGUEUR ART.: 10;
 CAPACITE MAX: 10;
 LOI D'ENTREE: Wait;
 LOI DE SORTIE: Wait;
 TEMPS DE CYCLE: 0.7;
 PANNES: Aucune;
 PRIORITE: Ind,fini;
 RESSOURCE:
 Reparation: Aucun;
 FIN
 RAPPORT: Individuel;
 PLANNING: Indefini;
FIN x3a4

a4j4

NOM DU CONVOYEUR: a4j4;
 QUANTITE: 1;
 TYPE: A_accumulation;
 LONGUEUR ART.: 20;
 CAPACITE MAX: 20;
 ACTIONS, Avant
 Debut
 IF NOCC (a4j4,1,1) = 1
 IF TYPE = PC
 c4pcl5 = c4pcl5 + 1
 ENDIF
 ENDIF
 Fin Actions
 LOI D'ENTREE: Wait;
 LOI DE SORTIE: Wait;
 TEMPS DE CYCLE: 1.0;
 PANNES: Aucune;
 PRIORITE: Indefini;
 RESSOURCE:
 Reparation: Aucun;
 FIN
 RAPPORT: Individuel;
 PLANNING: Indefini;

FIN a4j4**j4x4**

NOM DU CONVOYEUR: j4x4;
 QUANTITE: 1;
 TYPE: A_accumulation;
 LONGUEUR ART.: 3;
 CAPACITE MAX: 3;
 LOI D'ENTREE: Wait;
 LOI DE SORTIE: Wait;
 TEMPS DE CYCLE: 1.0;
 PANNES: Aucune;
 PRIORITE: 1;
 RESSOURCE:

Reparation: Aucun;

FIN

RAPPORT: Individuel;

PLANNING: Indefini;

FIN j4x4**x4a2**

NOM DU CONVOYEUR: x4a2;
 QUANTITE: 1;
 TYPE: A_accumulation;
 LONGUEUR ART.: 7;
 CAPACITE MAX: 7;
 LOI D'ENTREE: Wait;
 LOI DE SORTIE: IF TYPE = PC
 PUSH to a2a3 at Rear
 ELSE
 PUSH to a2x2 at Rear
 ENDIF;

TEMPS DE CYCLE: 1.6;

ACTIONS, Arriere

Debut

IF NOCC (x4a2,7,7) = 1

IF TYPE = PA

c5pa = c5pa + 1

ELSEIF TYPE = PB

c5pb4 = c5pb4 + 1

ELSEIF TYPE = PC

C5pc = c5pc + 1

ENDIF

ENDIF

Fin Actions

PANNES: Aucune;

PRIORITE: Indefini;

RESSOURCE:

Reparation: Aucun;

FIN

RAPPORT: Individuel;

PLANNING: Indefini;

FIN x4a2**a2a3**

NOM DU CONVOYEUR: a2a3;
 QUANTITE: 1;
 TYPE: A_accumulation;

LONGUEUR ART.: 10;

CAPACITE MAX: 10;

LOI D'ENTREE: Wait;

LOI DE SORTIE: PUSH to a3j3 at

Rear;

TEMPS DE CYCLE: 1.5;

PANNES: Aucune;

PRIORITE: Indefini;

RESSOURCE:

Reparation: Aucun;

FIN

RAPPORT: Individuel;

PLANNING: Indefini;

FIN a2a3**a3j3**

NOM DU CONVOYEUR: a3j3;

QUANTITE: 1;

TYPE: A_accumulation;

LONGUEUR ART.: 10;

CAPACITE MAX: 10;

LOI D'ENTREE: Wait;

LOI DE SORTIE: PUSH to cap1;

TEMPS DE CYCLE: 2.0;

PANNES: Aucune;

PRIORITE: 1;

RESSOURCE:

Reparation: Aucun;

FIN

RAPPORT: Individuel;

PLANNING: Indefini;

FIN a3j3**a3j2**

NOM DU CONVOYEUR: a3j2;

QUANTITE: 1;

TYPE: A_accumulation;

LONGUEUR ART.: 10;

CAPACITE MAX: 10;

LOI D'ENTREE: Wait;

LOI DE SORTIE: Wait;

TEMPS DE CYCLE: 1.0;

PANNES: Aucune;

PRIORITE: Indefini;

RESSOURCE:

Reparation: Aucun;

FIN

RAPPORT: Individuel;

PLANNING: Indefini;

FIN a3j2**alj1**

NOM DU CONVOYEUR: alj1;

QUANTITE: 1;

TYPE: A_accumulation;

LONGUEUR ART.: 10;

CAPACITE MAX: 10;

LOI D'ENTREE: Wait;

```

LOI DE SORTIE: PUSH to j1j4 at
Rear;
TEMPS DE CYCLE: 1.0;
PANNES: Aucune;
PRIORITE: 1;
RESSOURCE:
  Reparation: Aucun;
FIN
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini;
FIN a1j1
j1j4
NOM DU CONVOYEUR: j1j4;
QUANTITE: 1;
TYPE: A_accumulation;
LONGUEUR ART.: 10;
CAPACITE MAX: 10;
ACTIONS, Avant
Debut
  IF NOCC (j1j4,1,1) = 1
    IF TYPE = PC
      c4pc15 = c4pc15 + 1
    ENDIF
  ENDIF
Fin Actions
LOI D'ENTREE: Wait;
LOI DE SORTIE: PUSH to j4x4 at
Rear;
TEMPS DE CYCLE: 1.0;
PANNES: Aucune;
PRIORITE: Ind,fini;
RESSOURCE:
  Reparation: Aucun;
FIN
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini;
FIN j1j4

a4j1
NOM DU CONVOYEUR: a4j1;
QUANTITE: 1;
TYPE: A_accumulation;
LONGUEUR ART.: 10;
CAPACITE MAX: 10;
LOI D'ENTREE: Wait;
LOI DE SORTIE: PUSH to j1j4 at
Rear;
TEMPS DE CYCLE: 1.0;
PANNES: Aucune;
PRIORITE: 2;
RESSOURCE:
  Reparation: Aucun;
FIN
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini;
FIN a4j1

numpa
NOM DE L'ATTRIBUT: numpa;

```

```

QUANTITE: 1;
FIN numpa

numpb
NOM DE L'ATTRIBUT: numpb;
QUANTITE: 1;
FIN numpb

numpc
NOM DE L'ATTRIBUT: numpc;
QUANTITE: 1;
FIN numpc

cap1
NOM DE LA MACHINE: cap1;
QUANTITE: 1;
TYPE: Simple;
PRIORITE: 2;
RESSOURCE:
  Reparation: Aucun;
FIN
RESSOURCE:
  Cycle: Aucun;
FIN
LIENS DISCRETS :
  Remplir: Aucun
FIN
LIENS DISCRETS :
  Vider: Aucun
FIN
TEMPS DE CYCLE: 0.0;
PANNES: Aucune;
ACTIONS, Fin
Debut
  IF TYPE = PA
    clpa2 = clpa2 + 1
  ELSEIF TYPE = PB
    clpb42 = clpb42 + 1
  ELSEIF TYPE = PC
    clpc = clpc + 1
  ENDIF
Fin Actions
LOI D'ENTREE: Wait;
LOI DE SORTIE: PUSH to j3x1 at
Rear;
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini,0,0;
FIN cap1

cap2
NOM DE LA MACHINE: cap2;
QUANTITE: 1;
TYPE: Simple;
PRIORITE: Indefini;
RESSOURCE:
  Reparation: Aucun;

```

```

FIN
RESSOURCE:
  Cycle: Aucun;
FIN
LIENS DISCRETS :
  Remplir: Aucun
FIN
LIENS DISCRETS :
  Vider: Aucun
FIN
TEMPS DE CYCLE: 0.0;
PANNES: Aucune;
ACTIONS, Fin
Debut
  IF TYPE = PA
    c2pa21 = c2pa21 + 1
  ELSE
    IF TYPE = PB
      c2pb421 = c2pb421 + 1
    ELSE
      c2pcl = c2pcl + 1
    ENDIF
  ENDIF
Fin Actions
LOI D'ENTREE: PULL from x1j2 at
Front;
LOI DE SORTIE: PUSH to j2a1 at
Rear;
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini,0,0;
FIN cap2

cap3
NOM DE LA MACHINE: cap3;
QUANTITE: 1;
TYPE: Simple;
PRIORITE: Indefini;
RESSOURCE:
  Reparation: Aucun;
FIN
RESSOURCE:
  Cycle: Aucun;
FIN
LIENS DISCRETS :
  Remplir: Aucun
FIN
LIENS DISCRETS :
  Vider: Aucun
FIN
TEMPS DE CYCLE: 1.0;
PANNES: Aucune;
LOI D'ENTREE: Wait;
LOI DE SORTIE: Wait;
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini,0,0;
FIN cap3

cap4
NOM DE LA MACHINE: cap4;

```

```

QUANTITE: 1;
TYPE: Simple;
PRIORITE: Indefini;
RESSOURCE:
  Reparation: Aucun;
FIN
RESSOURCE:
  Cycle: Aucun;
FIN
LIENS DISCRETS :
  Remplir: Aucun
FIN
LIENS DISCRETS :
  Vider: Aucun
FIN
TEMPS DE CYCLE: Indefini;
PANNES: Aucune;
LOI D'ENTREE: Wait;
LOI DE SORTIE: Wait;
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini,0,0;
FIN cap4

cap5
NOM DE LA MACHINE: cap5;
QUANTITE: 1;
TYPE: Simple;
PRIORITE: Indefini;
RESSOURCE:
  Reparation: Aucun;
FIN
RESSOURCE:
  Cycle: Aucun;
FIN
LIENS DISCRETS :
  Remplir: Aucun
FIN
LIENS DISCRETS :
  Vider: Aucun
FIN
TEMPS DE CYCLE: Indefini;
PANNES: Aucune;
LOI D'ENTREE: Wait;
LOI DE SORTIE: Wait;
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini,0,0;
FIN cap5

cap6
NOM DE LA MACHINE: cap6;
QUANTITE: 1;
TYPE: Simple;
PRIORITE: Indefini;
RESSOURCE:
  Reparation: Aucun;
FIN
RESSOURCE:
  Cycle: Aucun;
FIN

```

LIENS DISCRETS :
Remplir: Aucun

FIN

LIENS DISCRETS :
Vider: Aucun

FIN

TEMPS DE CYCLE: Indefini;
PANNES: Aucune;
LOI D'ENTREE: Wait;
LOI DE SORTIE: Wait;
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini,0,0;
FIN cap6

nbsortie

NOM DE LA VARIABLE: nbsortie;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN nbsortie

enm1 NOM DU STOCK: enm1;
QUANTITE: 1;
CAPACITE: 1;
SEJOUR MINIMUM : Indefini;
POSITION ENTREE: Arriere;
CHERCHER A PARTIR DE: Avant;
* Selection: Premier;
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini,0;
FIN enm1

sorm1

NOM DU STOCK: sorm2;
QUANTITE: 1;
CAPACITE: 1;
SEJOUR MINIMUM : Indefini;
POSITION ENTREE: Arriere;
CHERCHER A PARTIR DE: Avant;
* Selection: Premier;
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini,0;
FIN sorm1

enm2

NOM DU STOCK: enm2;
QUANTITE: 1;
CAPACITE: 1;
SEJOUR MINIMUM : Indefini;
POSITION ENTREE: Arriere;
CHERCHER A PARTIR DE: Avant;
* Selection: Premier;
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini,0;
FIN enm2

sorm2

NOM DU STOCK: sorm2;
QUANTITE: 1;
CAPACITE: 1;
SEJOUR MINIMUM : Indefini;
POSITION ENTREE: Arriere;
CHERCHER A PARTIR DE: Avant;
* Selection: Premier;
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini,0;
FIN sorm2

enm3

NOM DU STOCK: enm3;
QUANTITE: 1;
CAPACITE: 1;
SEJOUR MINIMUM : Indefini;
POSITION ENTREE: Arriere;
CHERCHER A PARTIR DE: Avant;
* Selection: Premier;
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini,0;
FIN enm3

sorm3

NOM DU STOCK: sorm3;
QUANTITE: 1;
CAPACITE: 1;
SEJOUR MINIMUM : Indefini;
POSITION ENTREE: Arriere;
CHERCHER A PARTIR DE: Avant;
* Selection: Premier;
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini,0;
FIN sorm3

enm4

NOM DU STOCK: enm4;
QUANTITE: 1;
CAPACITE: 1;
SEJOUR MINIMUM : Indefini;
POSITION ENTREE: Arriere;
CHERCHER A PARTIR DE: Avant;
* Selection: Premier;
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini,0;
FIN enm4

sorm4

NOM DU STOCK: sorm4;
QUANTITE: 1;
CAPACITE: 1;
SEJOUR MINIMUM : Indefini;
POSITION ENTREE: Arriere;
CHERCHER A PARTIR DE: Avant;
* Selection: Premier;
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini,0;
FIN sorm4

enm5

NOM DU STOCK: enm5;
QUANTITE: 1;
CAPACITE: 1;
SEJOUR MINIMUM : Indefini;
POSITION ENTREE: Arriere;
CHERCHER A PARTIR DE: Avant;
* Selection: Premier;
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini,0;
FIN enm5

sorm5

NOM DU STOCK: sorm5;
QUANTITE: 1;
CAPACITE: 1;
SEJOUR MINIMUM : Indefini;
POSITION ENTREE: Arriere;
CHERCHER A PARTIR DE: Avant;
* Selection: Premier;
RAPPORT: Individuel;
PLANNING: Indefini,0;
FIN sorm5

clpa2

NOM DE LA VARIABLE: clpa2;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN clpa2

clpb42

NOM DE LA VARIABLE: clpb42;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN clpb42

clpc

NOM DE LA VARIABLE: clpc;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN clpc

cla

NOM DE LA VARIABLE: cla;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN cla

clb

NOM DE LA VARIABLE: clb;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN clb

c1c

NOM DE LA VARIABLE: c1c;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c1c

c2pa21

NOM DE LA VARIABLE: c2pa21;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c2pa21

c2pb421

NOM DE LA VARIABLE: c2pb421;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c2pb421

c2pc1

NOM DE LA VARIABLE: c2pc1;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c2pc1

C2a

NOM DE LA VARIABLE: c2a;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c2a

C2b

NOM DE LA VARIABLE: c2b;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c2b

c2c

NOM DE LA VARIABLE: c2c;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c2c

c3pa213

NOM DE LA VARIABLE: c3pa213;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c3pa213

c3pa21

NOM DE LA VARIABLE: c3pa21;
QUANTITE: 1;

RAPPORT: Oui;
FIN c3pa21

c3pc15

NOM DE LA VARIABLE: c3pc15;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c3pc15

c3pc1

NOM DE LA VARIABLE: c3pc1;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c3pc1

c3a2

NOM DE LA VARIABLE: c3a2;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c3a2

c3a1

NOM DE LA VARIABLE: c3a1;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c3a1

c3c15

NOM DE LA VARIABLE: c3c15;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c3c15

c3c1

NOM DE LA VARIABLE: c3c1;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c3c1

c4pa

NOM DE LA VARIABLE: c4pa;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c4pa

c4pa213

NOM DE LA VARIABLE: c4pa213;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c4pa213

c4pb

NOM DE LA VARIABLE: c4pb;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c4pb

C4pb42

NOM DE LA VARIABLE: c4pb42;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c4pb42

c4pb421

NOM DE LA VARIABLE: c4pb421;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c4pb421

c4pc

NOM DE LA VARIABLE: c4pc;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c4pc

c4p15

NOM DE LA VARIABLE: c4pc15;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c4pc15

c4pc154

NOM DE LA VARIABLE: c4pc154;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c4pc154

c4a

NOM DE LA VARIABLE: c4a;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c4a

c4a1

NOM DE LA VARIABLE: c4a1;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c4a1

c4b

NOM DE LA VARIABLE: c4b;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c4b

c4b1

NOM DE LA VARIABLE: c4b1;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c4b1

c4c

NOM DE LA VARIABLE: c4c;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c4c

c4c15

NOM DE LA VARIABLE: c4c15;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c4c15

c5pa

NOM DE LA VARIABLE: c5pa;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c5pa

c5pb4

NOM DE LA VARIABLE: c5pb4;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c5pb4

c5pc

NOM DE LA VARIABLE: c5pc;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c5pc

c5a

NOM DE LA VARIABLE: c5a;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c5a

c5b

NOM DE LA VARIABLE: c5b;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c5b

c5c

NOM DE LA VARIABLE: c5c;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c5c

c6pa213

NOM DE LA VARIABLE: c6pa213;

QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c6pa213

c6pb421

NOM DE LA VARIABLE: c6pb421;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c6pb421

c6pc154

NOM DE LA VARIABLE: c6pc154;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c6pc154

c6a

NOM DE LA VARIABLE: c6a;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c6a

c6b

NOM DE LA VARIABLE: c6b;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c6b

c6c15

NOM DE LA VARIABLE: c6c15;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN c6c15

fea1

NOM DE LA VARIABLE: fea1;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fea1

fsa1

NOM DE LA VARIABLE: fsa1;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fsa1

fea2

NOM DE LA VARIABLE: fea2;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fea2

fsa2

NOM DE LA VARIABLE: fsa2;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fsa2

fea3

NOM DE LA VARIABLE: fea3;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fea3

fsa3

NOM DE LA VARIABLE: fsa3;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fsa3

fea4

NOM DE LA VARIABLE: fea4;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fea4

fsa4

NOM DE LA VARIABLE: fsa4;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fsa4

fea5

NOM DE LA VARIABLE: fea5;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fea5

fsa5

NOM DE LA VARIABLE: fsa5;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fsa5

fea6

NOM DE LA VARIABLE: fea6;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fea6

fsa6

NOM DE LA VARIABLE: fsa6;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fsa6

feb1

NOM DE LA VARIABLE: feb1;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN feb1

fsb1

NOM DE LA VARIABLE: fsb1;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fsb1

feb2

NOM DE LA VARIABLE: fsb2;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fsb2

fsb2

NOM DE LA VARIABLE: fsb2;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fsb2

feb3

NOM DE LA VARIABLE: feb3;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN feb3

fsb3

NOM DE LA VARIABLE: fsb3;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fsb3

feb4

NOM DE LA VARIABLE: feb4;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN feb4

fsb4

NOM DE LA VARIABLE: fsb4;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fsb4

fec1

NOM DE LA VARIABLE: fec1;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fec1

fsc1
NOM DE LA VARIABLE: fsc1;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fsc1

fec2
NOM DE LA VARIABLE: fec2;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fec2

fsc2
NOM DE LA VARIABLE: fsc2;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fsc2

fec3
NOM DE LA VARIABLE: fec3;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fec3

fsc3
NOM DE LA VARIABLE: fsc3;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fsc3

fec4
NOM DE LA VARIABLE: fec4;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fec4

fsc4
NOM DE LA VARIABLE: fsc4;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fsc4

fec5
NOM DE LA VARIABLE: fec5;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fec5

fsc5
NOM DE LA VARIABLE: fsc5;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fsc5

fec6
NOM DE LA VARIABLE: fec6;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fec6

fsc6
NOM DE LA VARIABLE: fsc6;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fsc6

fec7
NOM DE LA VARIABLE: fec7;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fec7

fsc7
NOM DE LA VARIABLE: fsc7;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN fsc7

derivem1
NOM DE LA COURBE: derivem1;
QUANTITE: 1;
INTERVALLE D'ENREGISTREMENT:
2200.0 pour GO₁
8370.0 pour GO₁, GO₂ et GO₃;
EXPRESSION TRACEE : 1,alpham1a;
EXPRESSION TRACEE : 2,alpham1b;
EXPRESSION TRACEE : 3,alpham1c;
REINITIALISATION STATS : Oui;
PLANNING: horizon;
FIN derivem1

derivem2
NOM DE LA COURBE: derivem2;
QUANTITE: 1;
INTERVALLE D'ENREGISTREMENT:
2200.0 pour GO₁
8370.0 pour GO₁, GO₂ et GO₃;
EXPRESSION TRACEE : 1,alpham2a;
EXPRESSION TRACEE : 2,alpham2b;
REINITIALISATION STATS : Oui;
PLANNING: horizon;
FIN derivem2

derivem3
NOM DE LA COURBE: derivem3;

QUANTITE: 1;
INTERVALLE D'ENREGISTREMENT:
2200.0 pour GO₁
8370.0 pour GO₁, GO₂ et GO₃;
EXPRESSION TRACEE : 1,alpham3a;
REINITIALISATION STATS : Oui;
PLANNING: horizon;
FIN derivem3

derivem4

NOM DE LA COURBE: derivem4;
QUANTITE: 1;
INTERVALLE D'ENREGISTREMENT:
2200.0 pour GO₁
8370.0 pour GO₁, GO₂ et GO₃;
EXPRESSION TRACEE : 1,alpham4b;
EXPRESSION TRACEE : 2,alpham4c;
REINITIALISATION STATS : Oui;
PLANNING: horizon;
FIN derivem4

derivem5

NOM DE LA COURBE: derivem5;
QUANTITE: 1;
INTERVALLE D'ENREGISTREMENT:
2200.0 pour GO₁
8370.0 pour GO₁, GO₂ et GO₃;
EXPRESSION TRACEE : 1,alpham5c;
REINITIALISATION STATS : Oui;
PLANNING: horizon;
FIN derivem5

horizon

NOM DU PLANNING: horizon;
TYPE DE PLANNING: general;
DECALAGE:
Periode Active: 0.000000;
Periode Inactive: 0.000000;

ACTIONS, Fin

Debut

fea1 = c4pa - c4a
fsa1 = c5pa - c5a
fea2 = c5pa - c5a
fsa2 = c1pa2 - c1a
fea3 = c1pa2 - c1a
fsa3 = c2pa21 - c2a
fea4 = c2pa21 - c2a
fsa4 = c3pa21 - c3a1
fea5 = c3pa21 - c3a1
fsa5 = c3pa213 - c3a2
fea6 = c3pa213 - c3a2
fsa6 = c4pa213 - c4a1
feb1 = c4pb - c4b
fsb1 = c5pb4 - c5b
feb2 = c5pb4 - c5b
fsb2 = c1pb42 - c1b

feb3 = c1pb42 - c1b
fsb3 = c2pb421 - c2b
feb4 = c2pb421 - c2b
fsb4 = c4pb421 - c4b1
fec1 = c4pc - c4c
fsc1 = c5pc - c5c
fec2 = c5pc - c5c
fsc2 = c1pc - c1c
fec3 = c1pc - c1c
fsc3 = c2pc1 - c2c
fec4 = c2pc1 - c2c
fsc4 = c3pc1 - c3c1
fec5 = c3pc1 - c3c1
fsc5 = c3pc15 - c3c15
fec6 = c3pc15 - c3c15
fsc6 = c4pc15 - c4c15
fec7 = c4pc15 - c4c15
fsc7 = c4pc154 - c4c2
IF fsa1 <> 0
XA1 = ABS (fea1 / fsa1 - 1)
ENDIF
IF fsb1 <> 0
alpham4b = ABS (feb1 / fsb1 - 1)
XB1 = ABS (feb1 / fsb1 - 1)
ENDIF
IF fsc1 <> 0
XC1 = ABS (fec1 / fsc1 - 1)
ENDIF
IF fsa2 <> 0
alpham2a = ABS (fea2 / fsa2 - 1)
XA2 = ABS (fea2 / fsa2 - 1)
ENDIF
IF fsb2 <> 0
alpham2b = ABS (feb2 / fsb2 - 1)
XB2 = ABS (feb2 / fsb2 - 1)
ENDIF
IF fsc2 <> 0
XC2 = ABS (fec2 / fsc2 - 1)
ENDIF
IF fsa3 <> 0
alpham1a = ABS (fea3 / fsa3 - 1)
XA3 = ABS (fea3 / fsa3 - 1)
ENDIF
IF fsb3 <> 0
alpham1b = ABS (feb3 / fsb3 - 1)
XB3 = ABS (feb3 / fsb3 - 1)
ENDIF
IF fsc3 <> 0
alpham1c = ABS (fec3 / fsc3 - 1)
XC3 = ABS (fec3 / fsc3 - 1)
ENDIF
IF fsa4 <> 0
XA4 = ABS (fec4 / fsc4 - 1)
ENDIF
IF fsa5 <> 0
alpham3a = ABS (fea5 / fsa5 - 1)
XA5 = ABS (fea5 / fsa5 - 1)
ENDIF
IF fsb4 <> 0
XB4 = ABS (feb4 / fsb4 - 1)
ENDIF

```

IF fsc4 <> 0
  alpham5c = ABS (fec4 / fsc4 - 1)
  XC4 = ABS (fec4 / fsc4 - 1)
ENDIF
IF fsa5 <> 0
  XA5 = ABS (fea5 / fsa5 - 1)
ENDIF
IF fsc5 <> 0
  XC5 = ABS (fec5 / fsc5 - 1)
ENDIF
IF fsc6 <> 0
  XC6 = ABS (fec6 / fsc6 - 1)
ENDIF
IF fsc7 <> 0
  alpham4c = ABS (fec7 / fsc7 - 1)
  XC7 = ABS (fec7 / fsc7 - 1)
ENDIF
  reella = XA1
IF fsa2 <> 0
  reel2a = ABS (fea1 / fsa2 - 1)
ENDIF
IF fsa3 <> 0
  reel3a = ABS (fea1 / fsa3 - 1)
ENDIF
IF fsa4 <> 0
  reel4a = ABS (fea1 / fsa4 - 1)
ENDIF
IF fsa5 <> 0
  reel5a = ABS (fea1 / fsa5 - 1)
ENDIF
reellb = XB1
IF fsb2 <> 0
  reel2b = ABS (feb1 / fsb2 - 1)
ENDIF
IF fsb3 <> 0
  reel3b = ABS (feb1 / fsb3 - 1)
ENDIF
IF fsb4 <> 0
  reel4b = ABS (feb1 / fsb4 - 1)
ENDIF
reellc = XC1
IF fsc2 <> 0
  reel2c = ABS (fec1 / fsc2 - 1)
ENDIF
IF fsc3 <> 0
  reel3c = ABS (fec1 / fsc3 - 1)
ENDIF
IF fsc4 <> 0
  reel4c = ABS (fec1 / fsc4 - 1)
ENDIF
IF fsc5 <> 0
  reel5c = ABS (fec1 / fsc5 - 1)
ENDIF
IF fsc6 <> 0
  reel6c = ABS (fec1 / fsc6 - 1)
ENDIF
! ecriture des valeurs de taux de
derive de A,B et C dans des fichiers
WRITE degradea TIME
WRITE degradea
XA1,XA2,XA3,XA4,XA5

WRITE degradea
reella,reel2a,reel3a,reel4a,reel5a,
reel6a"\n"
WRITE degradeb TIME
WRITE degradeb XB1,XB2,XB3,XB4
WRITE degradeb
reellb,reel2b,reel3b,reel4b,"\n"
WRITE degradec TIME
WRITE degradec
XC1,XC2,XC3,XC4,XC5,XC6
WRITE degradec
reellc,reel2c,reel3c,reel4c,reel5c,re
el6c,reel7c"\n"
! mise a jour des variables capteurs
  c1a = c1pa2
  c1b = c1pb42
  c1c = c1pc
  c2a = c2pa21
  c2b = c2pb421
  c2c = c2pc1
  c3a1 = c3pa21
  c3a2 = c3pa213
  c3c15 = c3pc15
  c3c1 = c3pc1
  c4a = c4pa
  c4a1 = c4pa213
  c4b = c4pb
  c4b1 = c4pb421
  c4c = c4pc
  c4c15 = c4pc15
  c4c2 = c4pc154
  c5a = c5pa
  c5b = c5pb4
  c5c = c5pc
  c6a = c6pa213
  c6b = c6pb421
  c6c15 = c6pc154
  Fin Actions
  DONNEES DU PLANNING : (pour les
pièces P1)
    2200.000000,0.000000,0.000000
    2200.000000,0.000000,0.000000
  DONNEES DU PLANNING : (pour les
pièces P1, P2 et P3)
    8370.000000,0.000000,0.000000
    8370.000000,0.000000,0.000000
RAPPORT: Oui;
FIN horizon

sature
NOM DU PLANNING: sature;
TYPE DE PLANNING: general;
DECALAGE:
  Periode Active: 0.000000;
  Periode Inactive: 0.000000;
ACTIONS, Fin
  Debut
WRITE capteur "Temps :",TIME,"\n"
WRITE capteur "fea2=", fea2, "fsa2=",
fsa2

```

WRITE capteur "fea3=", fea3, "fsa3=",
fsa3
WRITE capteur "fea4=", fea4, "fsa4=",
fsa4, "\n"
NJ4X4 = c4pa - c5pa
NX4A2 = c4pa - c5pa
NA2X2 = c5pa - c1pa2
NX2J3 = c5pa - c1pa2
NJ3X1 = c1pa2 - c2pa21
NX1J2 = c1pa2 - c2pa21
NJ2A1 = c2pa21 - c3pa213
NA1X3 = c2pa21 - c3pa213
NX3A4 = c2pa21 - c3pa213
NA4J1 = c3pa213 - c6pa213
NJ1J4 = c3pa213 - c6pa213
WRITE capteur
"NJ4X4 (3)", NJ4X4, NPARTS (j4x4)
WRITE capteur
"NX4A2 (7)", NX4A2, NPARTS (x4a2)
WRITE capteur "R4=", NPARTS (R4)
WRITE capteur "M4=", NPARTS (M4)
WRITE capteur
"NA2X2 (10)", NA2X2, NPARTS (a2x2)
WRITE capteur
"NX2J3 (10)", NX2J3, NPARTS (x2j3)
WRITE capteur "R2=", NPARTS (R2)
WRITE capteur "M2=", NPARTS (M2)
WRITE capteur
"NJ3X1 (10)", NJ3X1, NPARTS (j3x1)
WRITE capteur
"NX1J2 (10)", NX1J2, NPARTS (x1j2)
WRITE capteur "R1=", NPARTS (R1)
WRITE capteur "M1=", NPARTS (M1)
WRITE capteur
"NJ2A1 (10)", NJ2A1, NPARTS (j2a1)
WRITE capteur
"NA1X3 (10)", NA1X3, NPARTS (a1x3)
WRITE capteur
"NX3A4 (10)", NX3A4, NPARTS (x3a4)
WRITE capteur "R3=", NPARTS (R3)
WRITE capteur "M3=", NPARTS (M3)
WRITE capteur
"NA4J1 (10)", NA4J1, NPARTS (a4j1)
WRITE capteur
"NJ1J4 (10)", NJ1J4, NPARTS (j1j4), "\n"
Fin Actions
DONNEES DU PLANNING: pour les
pièces P1 :
2200.000000, 0.000000, 0.000000
2200.000000, 0.000000, 0.000000
RAPPORT: Oui;
FIN sature

derivea

NOM DE LA COURBE: derivea;
QUANTITE: 1;
INTERVALLE D'ENREGISTREMENT:
2200.000000 (pour P1);
8370.000000 (pour P1, P2 et P3)
EXPRESSION TRACEE : 1, alphas1a;

EXPRESSION TRACEE : 2, alphas2a;
EXPRESSION TRACEE : 3, alphas3a;
REINITIALISATION STATS : Oui;
PLANNING: horizon;
FIN derivea

deriveb

NOM DE LA COURBE: deriveb;
QUANTITE: 1;
INTERVALLE D'ENREGISTREMENT:
2200.000000 (pour P1);
8370.000000 (pour P1, P2 et P3);
EXPRESSION TRACEE : 1, alphas1b;
EXPRESSION TRACEE : 2, alphas2b;
EXPRESSION TRACEE : 3, alphas4b;
REINITIALISATION STATS : Oui;
PLANNING: horizon;
FIN deriveb

derivec

NOM DE LA COURBE: derivec;
QUANTITE: 1;
INTERVALLE D'ENREGISTREMENT:
2200.000000 (pour P1);
8370.000000 (pour P1, P2 et P3);
EXPRESSION TRACEE : 1, alphas1c;
EXPRESSION TRACEE : 2, alphas4c;
EXPRESSION TRACEE : 3, alphas5c;
REINITIALISATION STATS : Oui;
PLANNING: horizon;
FIN derivec

alpham1a

NOM DE LA VARIABLE: alpham1a;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN alpham1a

alpham1b

NOM DE LA VARIABLE: alpham1b;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN alpham1b

alpham1c

NOM DE LA VARIABLE: alpham1c;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN alpham1c

alpham2a

NOM DE LA VARIABLE: alpham2a;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN alpham2a

alphan2b
NOM DE LA VARIABLE: alphan2b;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN alphan2b

alphan3a
NOM DE LA VARIABLE: alphan3a;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN alphan3a

alphan3c
NOM DE LA VARIABLE: alphan3c;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN alphan3c

alphan4b
NOM DE LA VARIABLE: alphan4b;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN alphan4b

alphan4c
NOM DE LA VARIABLE: alphan4c;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN alphan4c

alphan5c
NOM DE LA VARIABLE: alphan5c;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN alphan5c

reel1a
NOM DE LA VARIABLE: reel1a;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN reel1a

reel2a
NOM DE LA VARIABLE: reel2a;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN reel2a

reel3a
NOM DE LA VARIABLE: reel3a;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN reel3a

reel4a
NOM DE LA VARIABLE: reel4a;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN reel4a

reel5a
NOM DE LA VARIABLE: reel5a;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN reel5a

reel6a
NOM DE LA VARIABLE: reel6a;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN reel6a

reel1b
NOM DE LA VARIABLE: reel1b;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN reel1b

reel2b
NOM DE LA VARIABLE: reel2b;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN reel2b

reel3b
NOM DE LA VARIABLE: reel3b;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN reel3b

reel4b
NOM DE LA VARIABLE: reel4b;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN reel4b

reel1c
NOM DE LA VARIABLE: reel1c;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN reel1c

reel2c
NOM DE LA VARIABLE: reel2c;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN reel2c

reel3c
NOM DE LA VARIABLE: reel3c;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN reel3c

reel4c

```

NOM DE LA VARIABLE: reel4c;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN reel4c

reel5c
NOM DE LA VARIABLE: reel5c;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN reel5c

reel6c
NOM DE LA VARIABLE: reel6c;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN reel6c

reel7c
NOM DE LA VARIABLE: reel7c;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN reel7c

degradea
NOM DU FICHER: degradea;
NOM FICHER REEL: degradea.dat;
! TYPE: Ecriture;
ACTION SUR FICHER EXISTANT:
Assistance;
FIN degradea

degradeb
NOM DU FICHER: degradeb;
NOM FICHER REEL: degradeb.dat;
! TYPE: Ecriture;
ACTION SUR FICHER EXISTANT:
Assistance;
FIN degradeb

degradec
NOM DU FICHER: degradec;
NOM FICHER REEL: degradec.dat;
! TYPE: Ecriture;
ACTION SUR FICHER EXISTANT:
Assistance;
FIN degradec

mlcycle
NOM DE LA VARIABLE: mlcycle;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN mlcycle

tcyclem1
NOM DU PLANNING: tcyclem1;
TYPE DE PLANNING: general;
DECALAGE:
  Periode Active: 0.000000;
  Periode Inactive: 7200.000000;
  ACTIONS, D,but
  Debut
  Fin Actions
  DONNEES DU PLANNING:
    15000.000000,0.000000,0.000000
    15000.000000,0.000000,0.000000
    15000.000000,0.000000,0.000000
    15000.000000,0.000000,0.000000;
  RAPPORT: Oui;
FIN tcyclem1

tcyclem2
NOM DU PLANNING: tcyclem2;
TYPE DE PLANNING: general;
DECALAGE:
  Periode Active: 0.000000;
  Periode Inactive: 0.000000;
  DONNEES DU PLANNING:
  DONNEES DU PLANNING:
    20000.000000,0.000000,0.000000
    20000.000000,0.000000,0.000000
    20000.000000,0.000000,0.000000
    20000.000000,0.000000,0.000000;
  RAPPORT: Oui;
FIN tcyclem2

m2cycle
NOM DE LA VARIABLE: m2cycle;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN m2cycle

tcyclem3
NOM DU PLANNING: tcyclem2;
TYPE DE PLANNING: general;
DECALAGE:
  Periode Active: 0.000000;
  Periode Inactive: 0.000000;
  DONNEES DU PLANNING: Aucun;
  RAPPORT: Oui;
FIN tcyclem3

m3cycle
NOM DE LA VARIABLE: m3cycle;
QUANTITE: 1;
RAPPORT: Oui;
FIN m3cycle

capteur
NOM DU FICHER: capteur;
NOM FICHER REEL: capteur.dat;
! TYPE: Ecriture;
ACTION SUR FICHER EXISTANT:
Assistance;
FIN capteur

```

```
FIN SELECTION
FIN DECRIRE
# Partie Initialisation
□
INITIALISER
□
  Début
    m1cycle = 10 (pour P1) ou 9 (pour
P1, P2 et P3)
    m2cycle = 10 (pour P1) ou 15
(pour P1, P2 et P3)
    m3cycle = 10 (pour P1) ou 27
(pour P1, P2 et P3)
    cla = 0
    clb = 0
    clc = 0
    c2a = 0
    c2b = 0
    c2c = 0
    c3a1 = 0
    c3a2 = 0
    c3c15 = 0
    c3c1 = 0
    c4a = 0
    c4a1 = 0
    c4b = 0
    c4b1 = 0
    c4c = 0
    c4c2 = 0
    c4c15 = 0
    c5a = 0
    c5b = 0
    c5c = 0
    c6a = 0
    c6b = 0
    c6c15 = 0
  Fin Actions
FIN INITIALISE
```

**ANNEXE 3 : Résultats de la
Simulation de la gamme
opérateur GO₁**



Notations

XA1 = {J4X4}

XA2 = {O_{M2,1}, X4A2, A2X2, X2J3}

XA3 = { O_{M1,1}, J3X1, X1J2}

XA4 = { J2A1, A1R3}

XA5 = {R3M3, O_{M3,1}, M3R3}

XA6 = { X3A4, J1J4, A4J1}

Annexe 3.A :Donné es du fonctionnement normal

M2 = 10, M1 = 10, M3 = 10

Temps :	2200.0			
XA1= 0.0	XA2= 0.0204082	XA3= 0.0208334	XA4=	
0.0158731	XA5= 0.0271739			
reella= 0.0	reel2a= 0.0204082	reel3a= 0.0416666	reel4a=	
0.0582011	reel5a= 0.0869565			

Temps :	4400.0			
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0

Temps :	6600.0			
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0

Temps :	8800.0			
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0

Temps :	11000.0			
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0

Temps :	13200.0			
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0

Temps :	15400.0			
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0

Temps :	17600.0			
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0

Annexe 3

Temps :	19800.0				
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0	
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0	
Temps :	22000.0				
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0	
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0	
Temps :	24200.0				
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0	
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0	
Temps :	26400.0				
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0	
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0	
Temps :	28600.0				
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0	
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0	
Temps :	30800.0				
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0	
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0	
Temps :	33000.0				
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0	
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0	
Temps :	35200.0				
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0	
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0	
Temps :	37400.0				
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0	
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0	
Temps :	39600.0				
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0	
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0	
Temps :	41800.0				
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0	
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0	
Temps :	44000.0				
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0	
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0	
Temps :	46200.0				
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0	
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0	
Temps :	48400.0				
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0	
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0	

Annexe 3.B : Données du fonctionnement défaillant

1. M2 défailante

M2 (10) = 11.5 à partir de t = 10000, M1 = 10, M3 = 10

Temps : 2200.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0204082 XA3= 0.0208334 XA4=
 0.0158731 XA5= 0.0271739
 reella= 0.0 reel2a= 0.0204082 reel3a= 0.0416666 reel4a=
 0.0582011 reel5a= 0.0869565

Temps : 4400.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5= 0.0
 reella= 0.0 reel2a= 0.0 reel3a= 0.0 reel4a= 0.0 reel5a= 0.0

Temps : 6600.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5= 0.0
 reella= 0.0 reel2a= 0.0 reel3a= 0.0 reel4a= 0.0 reel5a= 0.0

Temps : 8800.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5= 0.0
 reella= 0.0 reel2a= 0.0 reel3a= 0.0 reel4a= 0.0 reel5a= 0.0

Temps : 11000.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0204082 XA3= 0.00507617 XA4= 0.0
 XA5= 0.0
 reella= 0.0 reel2a= 0.0204082 reel3a= 0.0152284 reel4a=
 0.0152284 reel5a= 0.0152284

Temps : 13200.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0471205 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5=
 0.0
 reella= 0.0 reel2a= 0.0471205 reel3a= 0.0471205 reel4a=
 0.0471205 reel5a= 0.0471205

Temps : 15400.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0471205 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5=
 0.00520831
 reella= 0.0 reel2a= 0.0471205 reel3a= 0.0471205 reel4a=
 0.0471205 reel5a= 0.0416666

Temps : 17600.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0416666 XA3= 0.0 XA4= 0.00523555
 XA5= 0.0
 reella= 0.0 reel2a= 0.0416666 reel3a= 0.0416666 reel4a=
 0.0471205 reel5a= 0.0471205

Temps : 19800.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0471205 XA3= 0.0 XA4= 0.00520831
 XA5= 0.00523555
 reella= 0.0 reel2a= 0.0471205 reel3a= 0.0471205 reel4a=
 0.0416666 reel5a= 0.0471205

Temps : 22000.0

Annexe 3

XA1= 0.0 0.00520831	XA2= 0.0471205	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5=
reel1a= 0.0 0.0471205	reel2a= 0.0471205 reel5a= 0.0416666	reel3a= 0.0471205		reel4a=
Temps : 24200.0				
XA1= 0.0 XA5= 0.0	XA2= 0.0416666	XA3= 0.00523555	XA4= 0.0	
reel1a= 0.0 0.0471205	reel2a= 0.0416666 reel5a= 0.0471205	reel3a= 0.0471205		reel4a=
Temps : 26400.0				
XA1= 0.0 XA5= 0.00523555	XA2= 0.0471205	XA3= 0.00520831	XA4= 0.0	
reel1a= 0.0 0.0416666	reel2a= 0.0471205 reel5a= 0.0471205	reel3a= 0.0416666		reel4a=
Temps : 28600.0				
XA1= 0.0 0.0	XA2= 0.0471205	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5=
reel1a= 0.0 0.0471205	reel2a= 0.0471205 reel5a= 0.0471205	reel3a= 0.0471205		reel4a=
Temps : 30800.0				
XA1= 0.0 XA5= 0.00520831	XA2= 0.0416666	XA3= 0.00523555	XA4= 0.0	
reel1a= 0.0 0.0471205	reel2a= 0.0416666 reel5a= 0.0416666	reel3a= 0.0471205		reel4a=
Temps : 33000.0				
XA1= 0.0 XA5= 0.00523555	XA2= 0.0471205	XA3= 0.00520831	XA4= 0.0	
reel1a= 0.0 0.0416666	reel2a= 0.0471205 reel5a= 0.0471205	reel3a= 0.0416666		reel4a=
Temps : 35200.0				
XA1= 0.0 0.0	XA2= 0.0471205	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5=
reel1a= 0.0 0.0471205	reel2a= 0.0471205 reel5a= 0.0471205	reel3a= 0.0471205		reel4a=
Temps : 37400.0				
XA1= 0.0 0.00520831	XA2= 0.0471205	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5=
reel1a= 0.0 0.0471205	reel2a= 0.0471205 reel5a= 0.0416666	reel3a= 0.0471205		reel4a=
Temps : 39600.0				
XA1= 0.0 XA5= 0.0	XA2= 0.0416666	XA3= 0.0	XA4= 0.00523555	
reel1a= 0.0 0.0471205	reel2a= 0.0416666 reel5a= 0.0471205	reel3a= 0.0416666		reel4a=
Temps : 41800.0				
XA1= 0.0 XA5= 0.00523555	XA2= 0.0471205	XA3= 0.0	XA4= 0.00520831	
reel1a= 0.0 0.0416666	reel2a= 0.0471205 reel5a= 0.0471205	reel3a= 0.0471205		reel4a=
Temps : 44000.0				

XA1= 0.0 XA2= 0.0471205 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5=
0.0
reella= 0.0 reel2a= 0.0471205 reel3a= 0.0471205 reel4a=
0.0471205 reel5a= 0.0471205

Temps : 46200.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0416666 XA3= 0.00523555 XA4= 0.0
XA5= 0.00520831
reella= 0.0 reel2a= 0.0416666 reel3a= 0.0471205 reel4a=
0.0471205 reel5a= 0.0416666

Temps : 48400.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0471205 XA3= 0.00520831 XA4= 0.0
XA5= 0.00523555
reella= 0.0 reel2a= 0.0471205 reel3a= 0.0416666 reel4a=
0.0416666 reel5a= 0.0471205

2. M1 défailante

M2 = 10, M1 (10) = 11.5 à partir de t = 10000, M3 = 10

Temps : 2200.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0204082 XA3= 0.0208334 XA4=
0.0158731 XA5= 0.0271739
reella= 0.0 reel2a= 0.0204082 reel3a= 0.0416666 reel4a=
0.0582011 reel5a= 0.0869565

Temps : 4400.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5= 0.0
reella= 0.0 reel2a= 0.0 reel3a= 0.0 reel4a= 0.0 reel5a= 0.0

Temps : 6600.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5= 0.0
reella= 0.0 reel2a= 0.0 reel3a= 0.0 reel4a= 0.0 reel5a= 0.0

Temps : 8800.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5= 0.0
reella= 0.0 reel2a= 0.0 reel3a= 0.0 reel4a= 0.0 reel5a= 0.0

Temps : 11000.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0 XA3= 0.0204082 XA4= 0.0 XA5=
0.00507617
reella= 0.0 reel2a= 0.0 reel3a= 0.0204082 reel4a= 0.0204082
reel5a= 0.0152284

Temps : 13200.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0152284 XA3= 0.0314136 XA4= 0.0
XA5= 0.0
reella= 0.0 reel2a= 0.0152284 reel3a= 0.0471205 reel4a=
0.0471205 reel5a= 0.0471205

Temps : 15400.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0416666 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5=
0.00523555
reella= 0.0 reel2a= 0.0416666 reel3a= 0.0416666 reel4a=
0.0416666 reel5a= 0.0471205

Annexe 3

Temps : 17600.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0471205 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5=
 0.0
 reella= 0.0 reel2a= 0.0471205 reel3a= 0.0471205 reel4a=
 0.0471205 reel5a= 0.0471205

Temps : 19800.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0471205 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5=
 0.00520831
 reella= 0.0 reel2a= 0.0471205 reel3a= 0.0471205 reel4a=
 0.0471205 reel5a= 0.0416666

Temps : 22000.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0471205 XA3= 0.00520831 XA4= 0.0
 XA5= 0.00523555
 reella= 0.0 reel2a= 0.0471205 reel3a= 0.0416666 reel4a=
 0.0416666 reel5a= 0.0471205

Temps : 24200.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0416666 XA3= 0.00523555 XA4= 0.0
 XA5= 0.0
 reella= 0.0 reel2a= 0.0416666 reel3a= 0.0471205 reel4a=
 0.0471205 reel5a= 0.0471205

Temps : 26400.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0471205 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5=
 0.00520831
 reella= 0.0 reel2a= 0.0471205 reel3a= 0.0471205 reel4a=
 0.0471205 reel5a= 0.0416666

Temps : 28600.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0471205 XA3= 0.00520831 XA4= 0.0
 XA5= 0.00523555
 reella= 0.0 reel2a= 0.0471205 reel3a= 0.0416666 reel4a=
 0.0416666 reel5a= 0.0471205

Temps : 30800.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0416666 XA3= 0.00523555 XA4= 0.0
 XA5= 0.0
 reella= 0.0 reel2a= 0.0416666 reel3a= 0.0471205 reel4a=
 0.0471205 reel5a= 0.0471205

Temps : 33000.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0471205 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5=
 0.00520831
 reella= 0.0 reel2a= 0.0471205 reel3a= 0.0471205 reel4a=
 0.0471205 reel5a= 0.0416666

Temps : 35200.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0471205 XA3= 0.00520831 XA4=
 0.00523555 XA5= 0.0
 reella= 0.0 reel2a= 0.0471205 reel3a= 0.0416666 reel4a=
 0.0471205 reel5a= 0.0471205

Temps : 37400.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0416666 XA3= 0.00523555 XA4=
 0.00520831 XA5= 0.00523555
 reella= 0.0 reel2a= 0.0416666 reel3a= 0.0471205 reel4a=
 0.0416666 reel5a= 0.0471205

Temps : 39600.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0471205 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5=
 0.00520831
 reel1a= 0.0 reel2a= 0.0471205 reel3a= 0.0471205 reel4a=
 0.0471205 reel5a= 0.0416666

Temps : 41800.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0471205 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5=
 0.0
 reel1a= 0.0 reel2a= 0.0471205 reel3a= 0.0471205 reel4a=
 0.0471205 reel5a= 0.0471205

Temps : 44000.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0416666 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5=
 0.00523555
 reel1a= 0.0 reel2a= 0.0416666 reel3a= 0.0416666 reel4a=
 0.0416666 reel5a= 0.0471205

Temps : 46200.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0471205 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5=
 0.0
 reel1a= 0.0 reel2a= 0.0471205 reel3a= 0.0471205 reel4a=
 0.0471205 reel5a= 0.0471205

Temps : 48400.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0471205 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5=
 0.00520831
 reel1a= 0.0 reel2a= 0.0471205 reel3a= 0.0471205 reel4a=
 0.0471205 reel5a= 0.0416666

3. M3 défailante

M2 = 10, M1 = 10, M3 (10) = 11.5 à partir de t = 10000

Temps : 2200.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0204082 XA3= 0.0208334 XA4=
 0.0158731 XA5= 0.0271739
 reel1a= 0.0 reel2a= 0.0204082 reel3a= 0.0416666 reel4a=
 0.0582011 reel5a= 0.0869565

Temps : 4400.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5= 0.0
 reel1a= 0.0 reel2a= 0.0 reel3a= 0.0 reel4a= 0.0 reel5a= 0.0

Temps : 6600.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5= 0.0
 reel1a= 0.0 reel2a= 0.0 reel3a= 0.0 reel4a= 0.0 reel5a= 0.0

Temps : 8800.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5= 0.0
 reel1a= 0.0 reel2a= 0.0 reel3a= 0.0 reel4a= 0.0 reel5a= 0.0

Temps : 11000.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0 XA3= 0.0 XA4= 0.0204082 XA5=
 0.00507617
 reel1a= 0.0 reel2a= 0.0 reel3a= 0.0 reel4a= 0.0204082 reel5a=
 0.0152284

Temps : 13200.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0 XA3= 0.0 XA4= 0.0471205 XA5=
0.0
reel1a= 0.0 reel2a= 0.0 reel3a= 0.0 reel4a= 0.0471205 reel5a=
0.0471205

Temps : 15400.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0 XA3= 0.010101 XA4= 0.03125 XA5=
0.00523555
reel1a= 0.0 reel2a= 0.0 reel3a= 0.010101 reel4a= 0.0416666
reel5a= 0.0471205

Temps : 17600.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0 XA3= 0.0416666 XA4= 0.00523555
XA5= 0.00520831
reel1a= 0.0 reel2a= 0.0 reel3a= 0.0416666 reel4a= 0.0471205
reel5a= 0.0416666

Temps : 19800.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0 XA3= 0.0471205 XA4= 0.0 XA5=
0.0
reel1a= 0.0 reel2a= 0.0 reel3a= 0.0471205 reel4a= 0.0471205
reel5a= 0.0471205

Temps : 22000.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0416666 XA3= 0.00523555 XA4=
0.00520831 XA5= 0.00523555
reel1a= 0.0 reel2a= 0.0416666 reel3a= 0.0471205 reel4a=
0.0416666 reel5a= 0.0471205

Temps : 24200.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0471205 XA3= 0.00520831 XA4=
0.00523555 XA5= 0.0
reel1a= 0.0 reel2a= 0.0471205 reel3a= 0.0416666 reel4a=
0.0471205 reel5a= 0.0471205

Temps : 26400.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0471205 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5=
0.00520831
reel1a= 0.0 reel2a= 0.0471205 reel3a= 0.0471205 reel4a=
0.0471205 reel5a= 0.0416666

Temps : 28600.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0416666 XA3= 0.00523555 XA4=
0.00520831 XA5= 0.00523555
reel1a= 0.0 reel2a= 0.0416666 reel3a= 0.0471205 reel4a=
0.0416666 reel5a= 0.0471205

Temps : 30800.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0471205 XA3= 0.00520831 XA4=
0.00523555 XA5= 0.0
reel1a= 0.0 reel2a= 0.0471205 reel3a= 0.0416666 reel4a=
0.0471205 reel5a= 0.0471205

Temps : 33000.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0471205 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5=
0.00520831
reel1a= 0.0 reel2a= 0.0471205 reel3a= 0.0471205 reel4a=
0.0471205 reel5a= 0.0416666

Temps : 35200.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0416666 XA3= 0.00523555 XA4= 0.0
XA5= 0.0
reella= 0.0 reel2a= 0.0416666 reel3a= 0.0471205 reel4a=
0.0471205 reel5a= 0.0471205

Temps : 37400.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0526316 XA3= 0.00523561 XA4=
0.00520831 XA5= 0.00523555
reella= 0.0 reel2a= 0.0526316 reel3a= 0.0471205 reel4a=
0.0416666 reel5a= 0.0471205

Temps : 39600.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0416666 XA3= 0.0 XA4= 0.00523555
XA5= 0.0
reella= 0.0 reel2a= 0.0416666 reel3a= 0.0416666 reel4a=
0.0471205 reel5a= 0.0471205

Temps : 41800.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0416666 XA3= 0.00523555 XA4= 0.0
XA5= 0.00520831
reella= 0.0 reel2a= 0.0416666 reel3a= 0.0471205 reel4a=
0.0471205 reel5a= 0.0416666

Temps : 44000.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0526316 XA3= 0.00523561 XA4=
0.00520831 XA5= 0.00523555
reella= 0.0 reel2a= 0.0526316 reel3a= 0.0471205 reel4a=
0.0416666 reel5a= 0.0471205

Temps : 46200.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0416666 XA3= 0.0 XA4= 0.00523555
XA5= 0.0
reella= 0.0 reel2a= 0.0416666 reel3a= 0.0416666 reel4a=
0.0471205 reel5a= 0.0471205

Temps : 48400.0
XA1= 0.0 XA2= 0.0416666 XA3= 0.00523555 XA4= 0.0
XA5= 0.00520831
reella= 0.0 reel2a= 0.0416666 reel3a= 0.0471205 reel4a=
0.0471205 reel5a= 0.0416666

**ANNEXE 4 : Résultats de la
Simulation des trois gammes
opératoires GO_1 , GO_2 et GO_3**

Notations

Gamme GO_1

$$XA1 = \{J4X4\}$$

$$XA2 = \{O_{M2,1}, X4A2, A2X2, X2J3\}$$

$$XA3 = \{O_{M1,1}, J3X1, X1J2\}$$

$$XA4 = \{J2A1, A1R3\}$$

$$XA5 = \{R3M3, O_{M3,1}, M3R3\}$$

$$XA6 = \{X3A4, J1J4, A4J1\}$$

Gamme GO_2

$$XB1 = \{J4X4, M4X4, X4M4, O_{M4,1}\}$$

$$XB2 = \{X4A2, A2X2, X2J3, O_{M2,2}\}$$

$$XB3 = \{J3X1, X1J2, O_{M1,1}\}$$

$$XB4 = \{J2A1, A1J1, J1J4\}$$

Gamme GO_3

$$XC1 = \{J4X4\}$$

$$XC2 = \{X4A2, A2A3, A3J3\}$$

$$XC3 = \{J3X1, X1J2, O_{M1,1}\}$$

$$XC4 = \{J2A1, A1R3\}$$

$$XC5 = \{R3M5, O_{M5,1}, M5R3\}$$

$$XC6 = \{R3A4, A4J4\}$$

$$XC7 = \{J4X4, M4X4, O_{M4,1}, O_{M4,2}, X4M4\}$$

Annexe 4.A : Fonctionnement normal

1. Gamme GO_1

$$M2 = 15, M1 = 9, M3 = 27$$

Temps :	8370.0				
XA1= 0.0	XA2= 0.00371742	XA3= 0.00373137	XA4=	XA5=	
0.00751877	XA5= 0.00377357				
reella= 0.0	reel2a= 0.00371742	reel3a= 0.00746274	reel4a=		
0.0150375	reel5a= 0.018868				
Temps :	16740.0				
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0	
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0	
Temps :	25110.0				
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0	
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0	
Temps :	33480.0				
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0	
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0	
Temps :	41850.0				
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0	
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0	
Temps :	50220.0				
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0	
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0	
Temps :	58590.0				
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0	
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0	
Temps :	66960.0				
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0	
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0	
Temps :	75330.0				
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0	
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0	
Temps :	83700.0				
XA1= 0.0	XA2= 0.0	XA3= 0.0	XA4= 0.0	XA5= 0.0	
reella= 0.0	reel2a= 0.0	reel3a= 0.0	reel4a= 0.0	reel5a= 0.0	

2. Gamme GO₂

M4 = 15, M2 = 15, M1 = 9

Temps :	8370.0				
XB1= 0.0	XB2= 0.00746274	XB3= 0.00374532	XB4=		
0.00375938					
reellb= 0.0	reel2b= 0.00746274	reel3b= 0.011236	reel4b=		
0.0150375					
Temps :	16740.0				
XB1= 0.0	XB2= 0.0	XB3= 0.0	XB4= 0.0		
reellb= 0.0	reel2b= 0.0	reel3b= 0.0	reel4b= 0.0		
Temps :	25110.0				
XB1= 0.0	XB2= 0.0	XB3= 0.0	XB4= 0.0		
reellb= 0.0	reel2b= 0.0	reel3b= 0.0	reel4b= 0.0		

```

Temps :          33480.0
XB1=   0.0      XB2=   0.0      XB3=   0.0      XB4=   0.0
reel1b= 0.0     reel2b= 0.0     reel3b= 0.0     reel4b= 0.0

Temps :          41850.0
XB1=   0.0      XB2=   0.0      XB3=   0.0      XB4=   0.0
reel1b= 0.0     reel2b= 0.0     reel3b= 0.0     reel4b= 0.0
Temps :          50220.0
XB1=   0.0      XB2=   0.0      XB3=   0.0      XB4=   0.0
reel1b= 0.0     reel2b= 0.0     reel3b= 0.0     reel4b= 0.0

Temps :          58590.0
XB1=   0.0      XB2=   0.0      XB3=   0.0      XB4=   0.0
reel1b= 0.0     reel2b= 0.0     reel3b= 0.0     reel4b= 0.0

Temps :          66960.0
XB1=   0.0      XB2=   0.0      XB3=   0.0      XB4=   0.0
reel1b= 0.0     reel2b= 0.0     reel3b= 0.0     reel4b= 0.0

Temps :          75330.0
XB1=   0.0      XB2=   0.0      XB3=   0.0      XB4=   0.0
reel1b= 0.0     reel2b= 0.0     reel3b= 0.0     reel4b= 0.0

Temps :          83700.0
XB1=   0.0      XB2=   0.0      XB3=   0.0      XB4=   0.0
reel1b= 0.0     reel2b= 0.0     reel3b= 0.0     reel4b= 0.0

```

3. Gamme GO₃

M1 = 9, M5 = 27, M4 = 15

```

Temps :          8370.0
XC1=   0.0      XC2=   0.00371742      XC3=   0.00373137      XC4=
0.00751877     XC5=   0.00377357      XC6=   0.00378788
reel1c= 0.0     reel2c= 0.00371742     reel3c= 0.00746274     reel4c=
0.0150375     reel5c= 0.018868     reel6c= 0.0227273

Temps :          16740.0
XC1=   0.0      XC2=   0.0      XC3=   0.0      XC4=   0.0      XC5=   0.0
XC6=   0.0
reel1c= 0.0     reel2c= 0.0     reel3c= 0.0     reel4c= 0.0     reel5c= 0.0
reel6c= 0.0

Temps :          25110.0
XC1=   0.0      XC2=   0.0      XC3=   0.0      XC4=   0.0      XC5=   0.0
XC6=   0.0
reel1c= 0.0     reel2c= 0.0     reel3c= 0.0     reel4c= 0.0     reel5c= 0.0
reel6c= 0.0

Temps :          33480.0
XC1=   0.0      XC2=   0.0      XC3=   0.0      XC4=   0.0      XC5=   0.0
XC6=   0.0
reel1c= 0.0     reel2c= 0.0     reel3c= 0.0     reel4c= 0.0     reel5c= 0.0
reel6c= 0.0

Temps :          41850.0

```

XC1=	0.0	XC2=	0.0	XC3=	0.0	XC4=	0.0	XC5=	0.0
XC6=	0.0								
reel1c=	0.0	reel2c=	0.0	reel3c=	0.0	reel4c=	0.0	reel5c=	0.0
reel6c=	0.0								

Temps : 50220.0

XC1=	0.0	XC2=	0.0	XC3=	0.0	XC4=	0.0	XC5=	0.0
XC6=	0.0								
reel1c=	0.0	reel2c=	0.0	reel3c=	0.0	reel4c=	0.0	reel5c=	0.0
reel6c=	0.0								

Temps : 58590.0

XC1=	0.0	XC2=	0.0	XC3=	0.0	XC4=	0.0	XC5=	0.0
XC6=	0.0								
reel1c=	0.0	reel2c=	0.0	reel3c=	0.0	reel4c=	0.0	reel5c=	0.0
reel6c=	0.0								

Temps : 66960.0

XC1=	0.0	XC2=	0.0	XC3=	0.0	XC4=	0.0	XC5=	0.0
XC6=	0.0								
reel1c=	0.0	reel2c=	0.0	reel3c=	0.0	reel4c=	0.0	reel5c=	0.0
reel6c=	0.0								

Temps : 75330.0

XC1=	0.0	XC2=	0.0	XC3=	0.0	XC4=	0.0	XC5=	0.0
XC6=	0.0								
reel1c=	0.0	reel2c=	0.0	reel3c=	0.0	reel4c=	0.0	reel5c=	0.0
reel6c=	0.0								

Temps : 83700.0

XC1=	0.0	XC2=	0.0	XC3=	0.0	XC4=	0.0	XC5=	0.0
XC6=	0.0								
reel1c=	0.0	reel2c=	0.0	reel3c=	0.0	reel4c=	0.0	reel5c=	0.0
reel6c=	0.0								

Annexe 4.B : Données du fonctionnement défaillant

1. M2 défaillante

1.1. Gamme GO₁

M2 (15) = 17 à partir de t = 15000, M1 = 9, M3 = 27

Temps : 8370.0

XA1=	0.0	XA2=	0.00371742	XA3=	0.00373137	XA4=	
	0.00751877	XA5=	0.00377357				
reel1a=	0.0	reel2a=	0.00371742	reel3a=	0.00746274	reel4a=	
	0.0150375	reel5a=	0.018868				

Temps : 16740.0

XA1=	0.0	XA2=	0.018868	XA3=	0.0	XA4=	0.0	XA5=	
	0.0								
reel1a=	0.0	reel2a=	0.018868	reel3a=	0.018868	reel4a=	0.018868		
reel5a=	0.018868								

Temps : 25110.0

XA1= 0.0 XA2= 0.097561 XA3= 0.0 XA4= 0.00404859
 XA5= 0.00406504
 reella= 0.0 reel2a= 0.097561 reel3a= 0.097561 reel4a=
 0.0931174 reel5a= 0.097561

Temps : 33480.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.097561 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5=
 0.00404859
 reella= 0.0 reel2a= 0.097561 reel3a= 0.097561 reel4a= 0.097561
 reel5a= 0.0931174

Temps : 41850.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.097561 XA3= 0.0 XA4= 0.0 XA5=
 0.0
 reella= 0.0 reel2a= 0.097561 reel3a= 0.097561 reel4a= 0.097561
 reel5a= 0.097561

1.2. Gamme GO₂

M4 = 15, M2 (15) = 17 à partir de t = 15000, M1 = 9

Temps : 8370.0
 XB1= 0.0 XB2= 0.00746274 XB3= 0.00374532 XB4=
 0.00375938
 reella= 0.0 reel2b= 0.00746274 reel3b= 0.011236 reel4b=
 0.0150375

Temps : 16740.0
 XB1= 0.0 XB2= 0.018868 XB3= 0.0 XB4= 0.0
 reella= 0.0 reel2b= 0.018868 reel3b= 0.018868 reel4b= 0.018868

Temps : 25110.0
 XB1= 0.0 XB2= 0.097561 XB3= 0.00404859 XB4= 0.0
 reella= 0.0 reel2b= 0.097561 reel3b= 0.0931174 reel4b=
 0.0931174

Temps : 33480.0
 XB1= 0.0 XB2= 0.097561 XB3= 0.0 XB4= 0.0
 reella= 0.0 reel2b= 0.097561 reel3b= 0.097561 reel4b= 0.097561

Temps : 41850.0
 XB1= 0.0 XB2= 0.0931174 XB3= 0.00406504 XB4= 0.0
 reella= 0.0 reel2b= 0.0931174 reel3b= 0.097561 reel4b= 0.097561

1.3. Gamme GO₃

M1 = 9, M5 = 27, M4 = 15

Temps : 8370.0
 XC1= 0.0 XC2= 0.00371742 XC3= 0.00373137 XC4=
 0.00751877 XC5= 0.00377357 XC6= 0.00378788

```

reel1c= 0.0      reel2c= 0.00371742      reel3c= 0.00746274      reel4c=
0.0150375      reel5c= 0.018868      reel6c= 0.0227273

Temps :          16740.0
XC1= 0.0      XC2= 0.0      XC3= 0.0      XC4= 0.0      XC5= 0.0
XC6= 0.0
reel1c= 0.0      reel2c= 0.0      reel3c= 0.0      reel4c= 0.0      reel5c= 0.0
reel6c= 0.0

Temps :          25110.0
XC1= 0.0      XC2= 0.097561      XC3= 0.0      XC4= 0.00404859
XC5= 0.0      XC6= 0.0
reel1c= 0.0      reel2c= 0.097561      reel3c= 0.097561      reel4c=
0.0931174      reel5c= 0.0931174      reel6c= 0.0931174

Temps :          33480.0
XC1= 0.0      XC2= 0.097561      XC3= 0.00404859      XC4=
0.00406504      XC5= 0.0      XC6= 0.0
reel1c= 0.0      reel2c= 0.097561      reel3c= 0.0931174      reel4c= 0.097561
reel5c= 0.097561      reel6c= 0.097561

Temps :          41850.0
XC1= 0.0      XC2= 0.0931174      XC3= 0.00406504      XC4= 0.0
XC5= 0.0      XC6= 0.0
reel1c= 0.0      reel2c= 0.0931174      reel3c= 0.097561      reel4c= 0.097561
reel5c= 0.097561      reel6c= 0.097561

```

2. M1 défailante

2.1. Gamme GO₁

M2 = 15, M1 (9) = 11 à partir de t = 15000, M3 = 27

```

Temps :          8370.0
XA1= 0.0      XA2= 0.00371742      XA3= 0.00373137      XA4=
0.00751877      XA5= 0.00377357
reel1a= 0.0      reel2a= 0.00371742      reel3a= 0.00746274      reel4a=
0.0150375      reel5a= 0.018868

Temps :          16740.0
XA1= 0.0      XA2= 0.00371742      XA3= 0.0112782      XA4=
0.00374532      XA5= 0.0
reel1a= 0.0      reel2a= 0.00371742      reel3a= 0.0150375      reel4a= 0.011236
reel5a= 0.011236

Temps :          25110.0
XA1= 0.0      XA2= 0.0629921      XA3= 0.0      XA4= 0.00395262
XA5= 0.0
reel1a= 0.0      reel2a= 0.0629921      reel3a= 0.0629921      reel4a=
0.0671936      reel5a= 0.0671936

Temps :          33480.0
XA1= 0.0      XA2= 0.0629921      XA3= 0.00395262      XA4=
0.00393701      XA5= 0.0
reel1a= 0.0      reel2a= 0.0629921      reel3a= 0.0671936      reel4a=
0.0629921      reel5a= 0.0629921

```

Temps : 41850.0
 XA1= 0.0 XA2= 0.0671936 XA3= 0.00393701 XA4=
 0.00395262 XA5= 0.0
 reel1a= 0.0 reel2a= 0.0671936 reel3a= 0.0629921 reel4a=
 0.0671936 reel5a= 0.0671936

2.2. Gamme GO_2

M4 = 15, M2 = 15, M1 (9) = 11 à partir de t = 15000

Temps : 8370.0
 XB1= 0.0 XB2= 0.00746274 XB3= 0.00374532 XB4=
 0.00375938
 reel1b= 0.0 reel2b= 0.00746274 reel3b= 0.011236 reel4b=
 0.0150375

Temps : 16740.0
 XB1= 0.00371742 XB2= 0.00370371 XB3= 0.011236 XB4=
 0.00375938
 reel1b= 0.00371742 reel2b= 0.0 reel3b= 0.011236 reel4b=
 0.0150375

Temps : 25110.0
 XB1= 0.00369006 XB2= 0.0669291 XB3= 0.00395262 XB4=
 0.00393701
 reel1b= 0.00369006 reel2b= 0.0629921 reel3b= 0.0671936 reel4b=
 0.0629921

Temps : 33480.0
 XB1= 0.0 XB2= 0.0671936 XB3= 0.00393701 XB4= 0.0
 reel1b= 0.0 reel2b= 0.0671936 reel3b= 0.0629921 reel4b=
 0.0629921

Temps : 41850.0
 XB1= 0.00371742 XB2= 0.0590551 XB3= 0.00395262 XB4=
 0.0
 reel1b= 0.00371742 reel2b= 0.0629921 reel3b= 0.0671936 reel4b=
 0.0671936

2.3. Gamme GO_3

M1 (9) = 11 à partir de t = 15000, M5 = 27, M4 = 15

Temps : 8370.0
 XC1= 0.0 XC2= 0.00371742 XC3= 0.00373137 XC4=
 0.00751877 XC5= 0.00377357 XC6= 0.00378788
 reel1c= 0.0 reel2c= 0.00371742 reel3c= 0.00746274 reel4c=
 0.0150375 reel5c= 0.018868 reel6c= 0.0227273

Temps : 16740.0

Annexe 4

XC1= 0.0 XC2= 0.0 XC3= 0.011236 XC4= 0.0 XC5=
0.0 XC6= 0.00373137
reel1c= 0.0 reel2c= 0.0 reel3c= 0.011236 reel4c= 0.011236
reel5c= 0.011236 reel6c= 0.00746274

Temps : 25110.0
XC1= 0.0 XC2= 0.0629921 XC3= 0.0 XC4= 0.0 XC5=
0.0 XC6= 0.00395262
reel1c= 0.0 reel2c= 0.0629921 reel3c= 0.0629921 reel4c=
0.0629921 reel5c= 0.0629921 reel6c= 0.0671936

Temps : 33480.0
XC1= 0.0 XC2= 0.0629921 XC3= 0.00395262 XC4= 0.0
XC5= 0.00393701 XC6= 0.0
reel1c= 0.0 reel2c= 0.0629921 reel3c= 0.0671936 reel4c=
0.0671936 reel5c= 0.0629921 reel6c= 0.0629921

Temps : 41850.0
XC1= 0.0 XC2= 0.0629921 XC3= 0.0 XC4= 0.0 XC5=
0.00395262 XC6= 0.00393701
reel1c= 0.0 reel2c= 0.0629921 reel3c= 0.0629921 reel4c=
0.0629921 reel5c= 0.0671936 reel6c= 0.0629921

**ANNEXE 5 : Programme de
traitement des fichiers de
données Witness**

/* Rôle du programme : Décomposition des fichiers de la simulation en sous-fichiers exploitables par Maple et comportant pour chaque gamme la date, les taux de dérive propres des ensembles de ressources et les taux de dérive des étapes correspondantes */

```
# include <stdio.h>
#include <fstream.h>
#include <string.h>
#include <conio.h>
#include <stdlib.h>

char *fichier_a;
char *fichier_b;
char *fichier_c;

void lecture(char *fichier, char *repertoire)
{
    char *chemin;
    char *line=new char[255];
    char *rep=new char[255];
    char *num="";
    int i=1;
    char *sorties= new char[255];
    FILE *entree, *sortie;

    chemin = repertoire;
    strcpy(rep,chemin);
    strcat(rep,fichier);
    if ((entree = fopen(rep, "rt")) == NULL)
        fprintf(stderr, "Cannot open input file.\n");
    while (!feof(entree))
    {
        strcpy(sorties, chemin);
        if (strcmp(rep,"c:\\ly\\simul\\degradea.txt")==0)
            strcpy(num, "\\filea");
        else if (strcmp(rep,"c:\\ly\\simul\\degradeb.txt")==0)
            strcpy(num, "\\fileb");
        else if (strcmp(rep,"c:\\ly\\simul\\degradec.txt")==0)
            strcpy(num, "\\filec");
        strcat(sorties, num);
        itoa(i, num, 10);
        strcat(sorties,num);
        strcpy(num, ".txt");
        strcat(sorties, num);
        if ((sortie = fopen(sorties, "wt")) == NULL)
            fprintf(stderr, "Cannot open output file.\n");
        for (int j=0; j<2;j++)
        {
            fgets(line, 255, entree);
            fputs(line, sortie);
            fputc('\n', sortie);
        }
    }
}
```

```
        }
        if (!feof(entree)) fgets(line,255,entree);
        fclose(sortie);
        i++;
    }
    fclose(entree);
}

void main()
{
    clrscr();
    char *repertoire = new char[255];
    strcpy(repertoire, "c:\\ly\\simul");

    /*traitement du fichier relatif a GO1*/
    fichiera = new char[255];
    strcpy(fichiera, "\\degradea.txt");
    lecture(fichiera, repertoire);
    getch();
    /*traitement du fichier relatif a GO2*/
    fichierb = new char[255];
    strcpy(fichierb, "\\degradeb.txt");
    lecture(fichierb, repertoire);
    getch();*/
    /*traitement du fichier relatif a GO3*/
    fichierc = new char[255];
    strcpy(fichierc, "\\degradec.txt");
    lecture(fichierc, repertoire);
    getch();
}
```

ANNEXE 6 : Programme de diagnostic

Programme de diagnostic

restart;

DECLARATION DES MACHINES DU SYSTEME

Machine1 := [O[M1,1]];

Machine2 := [O[M2,1], O[M2,2]];

Machine3 := [O[M3,1]];

Machine4 := [O[M4,1], O[M4,2]];

Machine5 := [O[M5,1]];

INITIALISATION DES TAUX DE DERIVE DES MACHINES

initr := proc()

global RDR, RDR1, RDR2, RDR3;

Opérations de la gamme GO1 et taux de dérive correspondants

RDR1 := [[[{Nop11}, {Machine2[1]}, {op(Machine1)}, {Nop12}, {op(Machine3)}, {Nop13}]],
 [[{a[1, 1, Nop11]}, {a[1, 1, O[M2,1]]}, {a[1, 1, O[M1,1]]}, {a[1, 1, Nop12]},
 {a[1, 1, O[M3,1]]}, {a[1, 1, Nop13]}]]];

Opérations de la gamme GO2 et taux de dérive correspondants

RDR2 := [[[{Machine4[1]}, {Machine2[2]}, {op(Machine1)}, {Nop21}]],
 [[{a[2, 1, O[M4,1]]}, {a[2, 1, O[M2,2]]}, {a[2, 1, O[M1,1]]}, {a[2, 1, Nop21]}]]];

Opérations de la gamme GO3 et taux de dérive correspondants

RDR3 := [[[{Nop31}, {Nop32}, {op(Machine1)}, {Nop33}, {op(Machine5)},
 {Nop34}, {op(Machine4)}]],
 [[{a[3, 1, Nop31]}, {a[3, 1, Nop32]}, {a[3, 1, O[M1, 1]]}, {a[3, 1, Nop33]},
 {a[3, 1, O[M5, 1]]}, {a[3, 1, Nop34]}, {a[3, 1, O[M4, 1]}, {a[3, 1, O[M4, 2]]}]]];

Opérations des trois gammes et taux de dérive correspondants

RDR := [[RDR1[1], RDR2[1], RDR3[1]], [RDR1[2], RDR2[2], RDR3[2]]];

End;

INITIALISATION DES TAUX DE DERIVE DES ENSEMBLES DE RESSOURCES

inits := proc()

global SDR, SDR1, SDR2, SDR3;

Ensembles de ressources de la gamme GO1 et taux de dérive des étapes

```
SDR1 := [ [ [ {J4X4}, {X4A2, A2X2, X2J3, Machine2[1]}, {op(Machine1), X1J2, J3X1},
             {J2A1, A1R3}, {op(Machine3), R3M3, M3R3}, {A4J1, J1J4, X3A4} ] ],
          [ [ {a[1, 1, 1]}, {a[1, 1, 2]}, {a[1, 1, 3]}, {a[1, 1, 4]}, {a[1, 1, 5]}, {a[1, 1, 6]} ] ] ];
```

Ensembles de ressources de la gamme GO2 et taux de dérive réels des étapes

```
SDR2 := [ [ [ {J4X4, Machine4[1], M4X4, X4M4}, {X4A2, A2X2, X2J3, Machine2[2]},
             {op(Machine1), X1J2, J3X1}, {A1J1, J1J4, J2A1} ] ],
          [ [ {a[2, 1, 1]}, {a[2, 1, 2]}, {a[2, 1, 3]}, {a[2, 1, 4]} ] ] ];
```

Ensembles de ressources de la gamme GO3 et taux de dérive réels des étapes

```
SDR3 := [ [ [ {J4X4}, {X4A2, A2A3, A3J3}, {op(Machine1), X1J2, J3X1},
             {J2A1, A1R3}, {op(Machine5), R3M5, M5R3}, {A4J4, R3A4},
             {J4X4, op(Machine4), M4X4, X4M4} ] ],
          [ [ {a[3, 1, 1]}, {a[3, 1, 2]}, {a[3, 1, 3]}, {a[3, 1, 4]}, {a[3, 1, 5]}, {a[3, 1, 6]},
             {a[3, 1, 6]} ] ] ];
```

Ensembles de ressources des trois gammes et taux de dérive réels des étapes correspondantes

```
SDR := [ [SDR1[1], SDR2[1], SDR3[1]], [SDR1[2], SDR2[2], SDR3[2]] ] ];
```

End;

LECTURE DES FICHIERS DE DONNEES DU FONCTIONNEMENT DEGRADE

POUR GO1 : on lit les fichiers "Filea.*" en fonctionnement dégradé*

POUR GO2 : on lit les fichiers "Fileb.*" en fonctionnement dégradé*

POUR GO3 : on lit les fichiers "Filec.*" en fonctionnement dégradé*

Lecture_degrade := proc()

global a, Tempo1, Tempo2, Tempo3, numfile;

if j = 1 then

 readlib(readdata);

 Tempo.j := readdata(evaln(Filea.numfile.'.txt'), 6);

 a[1, 1, Nop11] := evalf(Tempo.j[2][1], 3);

 a[1, 1, O[M2, 1]] := evalf(Tempo.j[2][2], 3);

 a[1, 1, O[M1, 1]] := evalf(Tempo.j[2][3], 3);

 a[1, 1, Nop12] := evalf(Tempo.j[2][4], 3);

 a[1, 1, O[M3, 1]] := evalf(Tempo.j[2][5], 3);

 a[1, 1, Nop13] := evalf(Tempo.j[2][6], 3);

 a[1, 1, 1] := evalf(Tempo.j[3][1], 3);

 a[1, 1, 2] := evalf(Tempo.j[3][2], 3);

 a[1, 1, 3] := evalf(Tempo.j[3][3], 3);

 a[1, 1, 4] := evalf(Tempo.j[3][4], 3);

 a[1, 1, 5] := evalf(Tempo.j[3][5], 3);

 a[1, 1, 5] := evalf(Tempo.j[3][5], 3);

elif j = 2 then

 readlib(readdata);

 Tempo.j := readdata(evaln(Fileb.numfile.'.txt'), 4);

 a[2, 1, O[M4, 1]] := evalf(Tempo.j[2][1], 3);

 a[2, 1, O[M2, 2]] := evalf(Tempo.j[2][2], 3);

 a[2, 1, O[M1, 1]] := evalf(Tempo.j[2][3], 3);

```

a[2, 1, Nop21] := evalf(Tempo.j[2][4], 3);
a[2, 1, 1] := evalf(Tempo.j[3][1], 3);
a[2, 1, 2] := evalf(Tempo.j[3][2], 3);
a[2, 1, 3] := evalf(Tempo.j[3][3], 3);
a[2, 1, 4] := evalf(Tempo.j[3][4], 3)

elif j = 3 then
  readlib(readdata);
  Tempo.j := readdata(evaln(Filec.numfile.`.txt`), 7);
  a[3, 1, Nop31] := evalf(Tempo.j[2][1], 3);
  a[3, 1, Nop32] := evalf(Tempo.j[2][2], 3);
  a[3, 1, O[M1, 1]] := evalf(Tempo.j[2][3], 3);
  a[3, 1, Nop33] := evalf(Tempo.j[2][2], 4);
  a[3, 1, O[M5, 1]] := evalf(Tempo.j[2][5], 3);
  a[3, 1, Nop33] := evalf(Tempo.j[2][6], 3);
  a[3, 1, O[M4, 1], O[M4, 2]] := evalf(Tempo.j[2][7], 3);
  a[3, 1, 1] := evalf(Tempo.j[3][1], 3);
  a[3, 1, 2] := evalf(Tempo.j[3][2], 3);
  a[3, 1, 3] := evalf(Tempo.j[3][3], 3);
  a[3, 1, 4] := evalf(Tempo.j[3][4], 3);
  a[3, 1, 5] := evalf(Tempo.j[3][5], 3);
  a[3, 1, 6] := evalf(Tempo.j[3][6], 3);
  a[3, 1, 7] := evalf(Tempo.j[3][7], 3);
fi;

End;

Regle1 := proc()
  local a_corr;                                # Taux de dérive corrigé
  global RDR, a, failing, unfailing, j, v, s, result1, Tempo, induit, taux_ind;

  if induit = 1 then
    a_corr := op(RDR[2][j][v][s]) - taux_ind;
  else a_corr := op(RDR[2][j][v][s]);
  fi;
  if a_corr < 0 then a_corr := 0 fi;
  if 0 < a_corr then
    failing := failing union RDR[1][j][v][s];
    induit := 1;
  elif a_corr = 0 then
    unfailing := unfailing union RDR[1][j][v][s];
  fi;
  result1 := [failing, unfailing]

End;

Regle2 := proc()
  local as;                                    # Taux de dérive estimé d'une étape
  global a, RDR, SDR, failing, unfailing, j, v, s, result2, induit, taux_ind;

```

```

if s = 1 then as := 0;
else as := (op(SDR[2][j][v][s - 1]) + 1)*(op(RDR[2][j][v][s]) + 1) - 1
fi;
b1:=as-0.0001;
b2:=as+0.0001;
if (op(SDR[2][j][v][s]) < b1) or (op(SDR[2][j][v][s]) > b2) then
  failing := failing union (SDR[1][j][v][s] minus RDR[1][j][v][nops(SRD[1][j][v])]); # on est
sure que certaines parties du chemin sont défailantes
else
  unfailing := unfailing union (SDR[1][j][v][s] minus SDR[1][j][v][nops(SRD[1][j][v])]); # on
est sure qu'aucune des parties du chemin n'est défailante
fi;
result2 := [failing, unfailing];
End;

```

Diagnosis := proc()

```

local Sol, Out;
global j, v, s, RDR, RDR1, RDR2, RDR3, failing, unfailing, numfile, induit, taux_ind;

Sol := {}; # Solution finale des ressources défailantes
Out := {}; # Solution finale des ressources non défailantes
failing := {}; # Solution temporaire des ressources défailantes
unfailing := {}; # Solution des ressources non défailantes
taux_ind := .007; # Taux de dérive induit

induit := 0;
for numfile to 1 do # Itération sur le nombre de fichiers
  for j to nops(RDR[1]) do # Itération sur le nombre de gammes
    Lecture_degrade();
    initr();
    inits();
    trace(Lecture_degrade);
    for v to nops(RDR[2][j]) do # Itération sur le nombre de variantes
      for s to nops(SDR[1][j][v]) do # Itération sur le nombre d'étapes
        Regle1();
        trace(Regle1);
        Regle2();
        trace(Regle2)
      od
    od
  od
od;
Sol := failing
Out := unfailing;
End;

```

Les résultats du diagnostic que nous présentons dans les deux paragraphes suivants portent sur les trois gammes opératoires GO_1 , GO_2 et GO_3 .

Pour chaque gamme opératoire, les fichiers du fonctionnement dégradé sont lus puis traités. Chaque fichier comporte :

- la date,
- les taux de dérive propres des ensembles de ressources,
- et les taux de dérive des étapes correspondantes.

Par exemple dans le cas ci-après la variable:

```
Tempo1 := [ [16740.0], [0, .00371742, .0112782, .00374532, 0],
            [0, .00371742, .0150375, .011236, .011236] ]
```

comporte les trois vecteurs lignes suivants :

[16740.0]	correspond à la date de début de dérive
[0, .00371742, .0112782, .00374532, 0]	correspondant aux taux de dérivées des ensembles de ressources de la gamme
[0, .00371742, .0150375, .011236, .011236]	correspond aux taux de dérivées réels des étapes de la gamme

Défaillance de la machine M1

Diagnosis();

```
{--> enter Lecture_degrade, args =
```

```
proc(fIdent) ... end
```

```
Tempo1 := [ [16740.0], [0, .00371742, .0112782, .00374532, 0],
            [0, .00371742, .0150375, .011236, .011236] ]
```

```
# Initialisation des taux de dérive des ensembles de ressources de la gamme GO1
```

```
  a[1, 1, Nop11] := 0
  a[1, 1, O[M2, 1]] := .00372
  a[1, 1, O[M1, 1]] := .0113
  a[1, 1, O[M3, 1]] := .00375
  a[1, 1, Nop12] := 0
```

```
# Initialisation des taux de dérive réels des étapes de la gamme GO1
```

```
  a[1, 1, 1] := 0
  a[1, 1, 2] := .00372
  a[1, 1, 3] := .0150
  a[1, 1, 4] := .0112
  a[1, 1, 5] := .0112
```

```
<-- exit Lecture_degrade (now in Diagnosis) = .112e-1}
```

```

--> enter Regle1, args =
    a_corr := 0
    unfailing := {Nop11}
    result1 := [{}, {Nop11}]
<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{}, {Nop11}]

--> enter Regle1, args =
    a_corr := .00372
    failing := {O[M2, 1]}
    induit := 1
    result1 := [{O[M2, 1]}, {J4X4, Nop11}]
<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1]}, {J4X4, Nop11}]

--> enter Regle2, args =
    as := .00372
    unfailing := {J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, O[M2, 1], Nop11}
result2 := [{O[M2, 1]}, {J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, O[M2, 1], Nop11}]
<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1]}, {J4X4, X4A2, A2X2,
X2J3, O[M2,1], Nop11}]

--> enter Regle1, args =
    a_corr := .0043
    failing := {O[M1, 1], O[M2, 1]}
    induit := 1
result1 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, O[M2, 1], Nop11}]
<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {J4X4, X4A2,
A2X2, X2J3, O[M2,1], Nop11}]

```

```
{--> enter Regle2, args =
```

```
as := .015062036
```

```
unfailing := {J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, X1J2, J3X1, O[M1, 1], O[M2, 1], Nop11}
```

```
result2 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]},
{J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, X1J2, J3X1, O[M1, 1], O[M2, 1], Nop11}]
```

```
<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {J4X4, X4A2,
A2X2, X2J3, X1J2, J3X1, O[M1,1], O[M2,1], Nop11}]}
```

```
{--> enter Regle1, args =
```

```
a_corr := -.00325
```

```
a_corr := 0
```

```
unfailing := {J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, X1J2, J3X1, O[M1, 1], O[M2, 1], O[M3, 1], Nop11}
```

```
result1 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, X1J2, J3X1,
O[M1, 1], O[M2, 1], O[M3, 1], Nop11}]
```

```
<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {J4X4, X4A2,
A2X2, X2J3, X1J2, J3X1, O[M1,1], O[M2,1], O[M3,1], Nop11}]}
```

```
{--> enter Regle2, args =
```

```
as := .018806250
```

```
unfailing := {J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, R3M3, X1J2, J3X1, J2A1, A1R3,
M3R3, O[M1, 1], O[M2, 1], O[M3, 1], Nop11}
```

```
result2 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, R3M3, X1J2,
J3X1, J2A1, A1R3, M3R3, O[M1, 1], O[M2, 1], O[M3, 1], Nop11}]
```

```
<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {J4X4, X4A2,
A2X2, X2J3, R3M3, X1J2, J3X1, J2A1, A1R3, M3R3, O[M1,1], O[M2,1],
O[M3,1], Nop11}]}
```

```
{--> enter Regle1, args =
```

```
a_corr := -.007
```

```
a_corr := 0
```

```
unfailing := {Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, R3M3, X1J2, J3X1, J2A1,
  A1R3, M3R3, O[M1, 1], O[M2, 1], O[M3, 1], Nop11}
```

```
result1 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3,
  R3M3, X1J2, J3X1, J2A1, A1R3, M3R3, O[M1, 1], O[M2, 1], O[M3, 1], Nop11}]
```

```
<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {Nop12,
  J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, R3M3, X1J2, J3X1, J2A1, A1R3, M3R3, O[M1,1],
  O[M2,1], O[M3,1], Nop11}]}
```

```
{--> enter Regle2, args =
```

```
as := .0112
```

```
unfailing := {Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2,
  J3X1, X3A4, J2A1, A1R3, M3R3, O[M1, 1], O[M2, 1], O[M3, 1], Nop11}
```

```
result2 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3,
  R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, J3X1, X3A4, J2A1, A1R3, M3R3, O[M1, 1],
  O[M2, 1], O[M3, 1], Nop11}]
```

```
<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {Nop12,
  J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, J3X1, X3A4, J2A1,
  A1R3, M3R3, O[M1,1], O[M2,1], O[M3,1], Nop11}]}
```

```
{--> enter Lecture_degrade, args =
```

```
proc(fldent) ... end
```

```
Tempo2 := [ [16740.0], [.00371742, .00370371, .011236, .00375938],
  [.00371742, 0, .011236, .0150375] ]
```

```
a[2, 1, O[M4, 1]] := .00372
```

```
a[2, 1, O[M2, 2]] := .00370
```

```
a[2, 1, O[M1, 1]] := .0112
```

```
a[2, 1, Nop21] := .00376
```

```
a[2, 1, 1] := .00372
```

```
a[2, 1, 2] := 0
```

```
a[2, 1, 3] := .0112
```

```
a[2, 1, 4] := .0150
```

```
<-- exit Lecture_degrade (now in Diagnosis) = .150e-1}
```

```
{--> enter Regle1, args =
```

```
a_corr := -.00328
```

a_corr := 0

unfailing := {Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, J3X1, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], O[M2, 1], O[M3, 1], Nop11}

result1 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, J3X1, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], O[M2, 1], O[M3, 1], Nop11}]

<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, J3X1, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4,1], M3R3, O[M1,1], O[M2,1], O[M3,1], Nop11}]}

{--> enter Regle2, args =

as := 0

unfailing := {Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], O[M2, 1], O[M3, 1], Nop11}

result2 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], O[M2, 1], O[M3, 1], Nop11}]

<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4,1], M3R3, O[M1,1], O[M2,1], O[M3,1], Nop11}]}

{--> enter Regle1, args =

a_corr := -.00330

a_corr := 0

unfailing := {Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11}

result1 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11}]

<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4,1], M3R3, O[M1,1], O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], Nop11}]}

```

{--> enter Regle2, args =

as := .007433764

unfailing := {Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2,
M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1],
O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11}

result2 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3,
R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3,
O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11}]

<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {Nop12,
J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4,
X3A4, J2A1, A1R3, O[M4,1], M3R3, O[M1,1], O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], Nop11}]}

{--> enter Regle1, args =

a_corr := .0042

failing := {O[M1, 1], O[M2, 1]}

induit := 1

result1 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3,
R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3,
O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11}]

<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {Nop12,
J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4,
X3A4, J2A1, A1R3, O[M4,1], M3R3, O[M1,1], O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], Nop11}]}

{--> enter Regle2, args =

as := .0112

unfailing := {Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2,
M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1],
O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11}

result2 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3,
R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3,
O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11}]

<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {Nop12,
J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4,
X3A4, J2A1, A1R3, O[M4,1], M3R3, O[M1,1], O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], Nop11}]}

```

```

{--> enter Regle1, args =

    a_corr := -.00324

    a_corr := 0

unfailing := {Nop21, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, R3M3, A4J1, J1J4,
    X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4, 1], M3R3,
    O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11}

result1 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {Nop21, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2,
X2J3, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3,
O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11}]

<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {Nop21,
Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1,
X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4,1], M3R3, O[M1,1], O[M2,1], O[M2,2],
O[M3,1], Nop11}]}

{--> enter Regle2, args =

    as := .015002112

unfailing := {Nop21, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1,
    J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4, 1], M3R3,
    O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11}

result2 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {Nop21, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2,
X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1,
A1R3, O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11}]

<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {Nop21,
Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4,
J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4,1], M3R3, O[M1,1], O[M2,1],
O[M2,2], O[M3,1], Nop11}]}

{--> enter Lecture_degrade, args =

    proc(fIdent) ... end

Tempo3 := [[16740.0], [0, 0, .011236, 0, 0, .00373137],
    [0, 0, .011236, .011236, .011236, .00746274]]

a[3, 1, Nop31] := 0

```

```

a[3, 1, Nop32] := 0
a[3, 1, O[M1, 1]] := .0112
a[3, 1, O[M5, 1]] := 0
a[3, 1, O[M4, 1], O[M4, 2]] := .00373
a[3, 1, Nop33] := 0

```

```

a[3, 1, 1] := 0
a[3, 1, 2] := 0
a[3, 1, 3] := .0112
a[3, 1, 4] := .0112
a[3, 1, 5] := .0112
a[3, 1, 6] := .00746

```

```
<-- exit Lecture_degrade (now in Diagnosis) = .746e-2}
```

```
{--> enter Regle1, args =
```

```
a_corr := -.007
```

```
a_corr := 0
```

```
unfailing := {Nop21, Nop12, Nop31, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3,
A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4, 1],
M3R3, O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11}
```

```
result1 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {Nop21, Nop12, Nop31, J4X4, X4A2,
A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4,
J2A1, A1R3, O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2],
O[M3, 1], Nop11}]
```

```
<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {Nop21,
Nop12, Nop31, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2,
M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4,1], M3R3, O[M1,1], O[M2,1],
O[M2,2], O[M3,1], Nop11}]}
```

```
{--> enter Regle2, args =
```

```
as := 0
```

```
unfailing : {Nop21, Nop12, Nop31, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3,
A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4, 1],
M3R3, O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11}
```

```
result2 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {Nop21, Nop12, Nop31, J4X4, X4A2,
A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4,
J2A1, A1R3, O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2],
O[M3, 1], Nop11}]
```

```

<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {Nop21,
Nop12, Nop31, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2,
M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4,1], M3R3, O[M1,1], O[M2,1],
O[M2,2], O[M3,1], Nop11}]

```

```

{--> enter Regle1, args =

```

```

a_corr := -.007

```

```

a_corr := 0

```

```

unfailing := {Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3,
A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3,
O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11}

```

```

result1 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4,
X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4,
X3A4, J2A1, A1R3, O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2],
O[M3, 1], Nop11}]

```

```

<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {Nop21,
Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4,
X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4,1], M3R3, O[M1,1],
O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], Nop11}]

```

```

{--> enter Regle2, args =

```

```

as := 0

```

```

unfailing := {Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3,
A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3,
O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], A2A3, A3J3, O[M2, 1], O[M2, 2],
O[M3, 1], Nop11}

```

```

result2 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4,
X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4,
X3A4, J2A1, A1R3, O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], A2A3, A3J3, O[M2, 1],
O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11}]

```

```

<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {Nop21,
Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4,
X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4,1], M3R3, O[M1,1],
A2A3, A3J3, O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], Nop11}]

```

```

{--> enter Regle1, args =

```

```

a_corr := .0042

```

failing := {O[M1, 1], O[M2, 1]}

induit := 1

result1 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], A2A3, A3J3, O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11}]

<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4,1], M3R3, O[M1,1], A2A3, A3J3, O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], Nop11}]}

{--> enter Regle2, args =

as := .0112

unfailing := {Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], A2A3, A3J3, O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11}

result2 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], A2A3, A3J3, O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11}]

<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4,1], M3R3, O[M1,1], A2A3, A3J3, O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], Nop11}]}

{--> enter Regle1, args =

a_corr := -.007

a_corr := 0

unfailing := {O[M5, 1], Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], A2A3, A3J3, O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11}

result1 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {O[M5, 1], Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], A2A3, A3J3, O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11}]

```

<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {O[M5,1],
Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1,
J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4,1], M3R3,
O[M1,1], A2A3, A3J3, O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], Nop11}]}

```

```

{--> enter Regle2, args =

```

```

as := .0112

```

```

unfailing := {O[M5, 1], Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2,
X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1,
A1R3, O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], A2A3, A3J3, R3M5, O[M2, 1],
O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11, M5R3}

```

```

result2 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {O[M5, 1], Nop21, Nop12, Nop31,
Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4,
J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], A2A3,
A3J3, R3M5, O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11, M5R3}]

```

```

<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {O[M5,1],
Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1,
J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4,1], M3R3,
O[M1,1], A2A3, A3J3, R3M5, O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], Nop11, M5R3}]}

```

```

{--> enter Regle1, args =

```

```

a_corr := -.007

```

```

a_corr := 0

```

```

unfailing := {O[M5, 1], Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, Nop33, J4X4, X4A2,
A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4,
J2A1, A1R3, O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], A2A3, A3J3, R3M5, O[M2, 1],
O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11, M5R3}

```

```

result1 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {O[M5, 1], Nop21, Nop12, Nop31,
Nop32, Nop33, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4,
X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4, 1], M3R3,
O[M1, 1], A2A3, A3J3, R3M5, O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11, M5R3}]

```

```

<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {O[M5,1],
Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, Nop33, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3,
A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, O[M4,1], M3R3,
O[M1,1], A2A3, A3J3, R3M5, O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], Nop11, M5R3}]}

```

```

{--> enter Regle2, args =

```

as := .0112

unfailing := {O[M5, 1], Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, Nop33, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, A4J4, R3A4, O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], A2A3, A3J3, R3M5, O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11, M5R3}

result2 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {O[M5, 1], Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, Nop33, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, A4J4, R3A4, O[M4, 1], M3R3, O[M1, 1], A2A3, A3J3, R3M5, O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11, M5R3}]

<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {O[M5,1], Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, Nop33, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, A4J4, R3A4, O[M4,1], M3R3, O[M1,1], A2A3, A3J3, R3M5, O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], Nop11, M5R3}]}

{--> enter Regle1, args =

a_corr := -.00327

a_corr := 0

unfailing := {O[M5, 1], Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, Nop33, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, A4J4, R3A4, O[M4, 1], O[M4, 2], M3R3, O[M1, 1], A2A3, A3J3, R3M5, O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11, M5R3}

result1 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {O[M5, 1], Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, Nop33, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, A4J4, R3A4, O[M4, 1], O[M4, 2], M3R3, O[M1, 1], A2A3, A3J3, R3M5, O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11, M5R3}]

<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {O[M5,1], Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, Nop33, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, A4J4, R3A4, O[M4,1], O[M4,2], M3R3, O[M1,1], A2A3, A3J3, R3M5, O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], Nop11, M5R3}]}

{--> enter Regle2, args =

as := .014971776

unfailing := {O[M5, 1], Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, Nop33, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, A4J4, R3A4, O[M4, 1], O[M4, 2], M3R3, O[M1, 1], A2A3,

A3J3, R3M5, O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], Nop11, M5R3}

result2 := [{O[M1, 1], O[M2, 1]}, {O[M5, 1], Nop21, Nop12, Nop31,
Nop32, Nop33, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4,
X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, A4J4, R3A4, O[M4, 1],
O[M4, 2], M3R3, O[M1, 1], A2A3, A3J3, R3M5, O[M2, 1], O[M2, 2],
O[M3, 1], Nop11, M5R3}]

*<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M1,1], O[M2,1]}, {O[M5,1],
Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, Nop33, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, A1J1, R3M3,
A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1, A1R3, A4J4, R3A4,
O[M4,1], O[M4,2], M3R3, O[M1,1], A2A3, A3J3, R3M5, O[M2,1], O[M2,2],
O[M3,1], Nop11, M5R3}]}*

Sol := {O[M1, 1], O[M2, 1]}

**Out := {O[M5,1], Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, Nop33, J4X4, X4A2, A2X2,
X2J3, A1J1, R3M3, A4J1, J1J4, X1J2, M4X4, J3X1, X4M4, X3A4, J2A1,
A1R3, A4J4, R3A4, O[M4,1], O[M4,2], M3R3, O[M1,1], A2A3,
A3J3, R3M5, O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], Nop11, M5R3}**

Remarque :

Ici, on détecte que l'opération $O_{M2,1}$ de la machine M2 est également défailante parce que la dérive de M1 s'est propagée dès la première période d'observation.

Défaillance de la machine M2

```

    > Diagnosis();
    {--> enter Lecture_degrade, args =

        proc(fldent) ... end

Tempo1 := [[16740.0], [0, .018868, 0, 0, 0], [0, .018868, .018868, .018868, .018868]]

    a[1, 1, Nop11] := 0
    a[1, 1, O[M2, 1]] := .0189
    a[1, 1, O[M1, 1]] := 0
    a[1, 1, O[M3, 1]] := 0
    a[1, 1, Nop12] := 0

    a[1, 1, 1] := 0
    a[1, 1, 2] := .0189
    a[1, 1, 3] := .0189
    a[1, 1, 4] := .0189
    a[1, 1, 5] := .0189

<-- exit Lecture_degrade (now in Diagnosis) = .189e-1}

    {--> enter Regle1, args =

        a_corr := 0

        unfailing := {Nop11}

        result1 := [{}, {Nop11}]

<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{}, {Nop11}}

    {--> enter Regle2, args =

        as := 0

        unfailing := {Nop11, J4X4}

        result2 := [{}, {Nop11, J4X4}]

<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{}, {Nop11, J4X4}}

```

```

{--> enter Regle1, args =
    a_corr := .0189
    failing := {O[M2, 1]}
    induit := 1
    result1 := [{O[M2, 1]}, {Nop11, J4X4}]
<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1]}, {Nop11, J4X4}}]

{--> enter Regle2, args =
    as := .0189
    unfailing := {O[M2, 1], Nop11, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3}
    result2 := [{O[M2, 1]}, {O[M2, 1], Nop11, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3}]
<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1]}, {O[M2,1], Nop11,
    J4X4, X4A2, A2X2, X2J3}}]

{--> enter Regle1, args =
    a_corr := -.007
    a_corr := 0
    unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], Nop11, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3}
    result1 := [{O[M2, 1]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], Nop11, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3}]
<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1]}, {O[M1,1], O[M2,1],
    Nop11, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3}}]

{--> enter Regle2, args =
    as := .0189
    unfailing :=
    {O[M1, 1], O[M2, 1], Nop11, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2}
    unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], Nop11, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2}

```

```

result2 := [{O[M2, 1]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], Nop11, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2}]

<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1]}, {O[M1,1], O[M2,1],
Nop11, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2}}

        {--> enter Regle1, args =

                a_corr := -.007

                a_corr := 0

unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M3, 1], Nop11, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2}

        result1 := [{O[M2, 1]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M3, 1], Nop11,
J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2}]

<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1]}, {O[M1,1], O[M2,1],
O[M3,1], Nop11, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2}}

        {--> enter Regle2, args =

                as := .0189

unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M3, 1], Nop11, J4X4, X4A2, A2X2,
X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, M3R3}

        result2 := [{O[M2, 1]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M3, 1], Nop11, J4X4,
X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, M3R3}]

<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1]}, {O[M1,1], O[M2,1],
O[M3,1], Nop11, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, M3R3}}

        {--> enter Regle1, args =

                a_corr := -.007

                a_corr := 0

unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M3, 1], Nop11, Nop12, J4X4, X4A2,
A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, M3R3}

        result1 := [{O[M2, 1]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M3, 1], Nop11, Nop12,
J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, M3R3}]

<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1]}, {O[M1,1], O[M2,1],
O[M3,1], Nop11, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3,

```

R3M3, M3R3}}}

{--> enter Regle2, args =

as := .0189

unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M3, 1], Nop11, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4}

result2 := [{O[M2, 1]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M3, 1], Nop11, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4}]

<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1]}, {O[M1,1], O[M2,1], O[M3,1], Nop11, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4}]}

{--> enter Lecture_degrade, args =

proc(fldent) ... end

Tempo2 := [[16740.0], [0, .018868, 0, 0], [0, .018868, .018868, .018868]]

*a[2, 1, O[M4, 1]] := 0
a[2, 1, O[M2, 2]] := .0189
a[2, 1, O[M1, 1]] := 0
a[2, 1, Nop21] := 0*

*a[2, 1, 1] := 0
a[2, 1, 2] := .0189
a[2, 1, 3] := .0189
a[2, 1, 4] := .0189*

<-- exit Lecture_degrade (now in Diagnosis) = .189e-1}

{--> enter Regle1, args =

a_corr := -.007

a_corr := 0

unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4}

result1 := [{O[M2, 1]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3,

R3M3, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4}]

*<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1]}, {O[M1,1]}, O[M2,1],
O[M3,1], O[M4,1], Nop11, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2,
J2A1, A1R3, R3M3, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4}]}*

{--> enter Regle2, args =

as := 0

*unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11, Nop12,
J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3,
X3A4, A4J1, J1J4, M4X4}*

*result2 := [{O[M2, 1]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M3, 1], O[M4, 1],
Nop11, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3,
R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4}]*

*<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1]}, {O[M1,1]}, O[M2,1],
O[M3,1], O[M4,1], Nop11, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2,
J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4}]}*

{--> enter Regle1, args =

a_corr := .0119

failing := {O[M2, 1], O[M2, 2]}

induit := 1

*result1 := [{O[M2, 1], O[M2, 2]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M3, 1],
O[M4, 1], Nop11, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1,
A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4}]*

*<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1]}, O[M2,2]}, {O[M1,1],
O[M2,1], O[M3,1], O[M4,1], Nop11, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1,
X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4}]}*

{--> enter Regle2, args =

as := .0189

*unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11,
Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4,
M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4}*

*result2 := [{O[M2, 1], O[M2, 2]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2],
O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1,
X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4}]*

```

<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1], O[M2,2]}, {O[M1,1],
O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], O[M4,1], Nop11, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2,
X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4,
M4X4}]}

```

```

{--> enter Regle1, args =

```

```

a_corr := -.007

```

```

a_corr := 0

```

```

unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11,
Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4,
M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4}

```

```

result1 := [{O[M2, 1], O[M2, 2]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2],
O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1,
X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4}]

```

```

<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1], O[M2,2]}, {O[M1,1],
O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], O[M4,1], Nop11, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2,
X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1,
J1J4, M4X4}]}

```

```

{--> enter Regle2, args =

```

```

as := .0189

```

```

unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11,
Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4,
M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4}

```

```

result2 := [{O[M2, 1], O[M2, 2]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2],
O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1,
X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4}]

```

```

<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1], O[M2,2]}, {O[M1,1],
O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], O[M4,1], Nop11, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2,
X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4,
M4X4}]}

```

```

{--> enter Regle1, args =

```

```

a_corr := -.007

```

```

a_corr := 0

```

```

unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11,

```

```

Nop21, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3,
R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4}

result1 := [{O[M2, 1], O[M2, 2]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2],
O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11, Nop21, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3,
J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4}]

<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1], O[M2,2]}, {O[M1,1],
O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], O[M4,1], Nop11, Nop21, Nop12, J4X4, X4A2,
A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1,
J1J4, M4X4}]}

{--> enter Regle2, args =

as := .0189

unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11,
Nop21, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3,
R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1}

result2 := [{O[M2, 1], O[M2, 2]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2],
O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11, Nop21, Nop12, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3,
J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1}]

<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1], O[M2,2]}, {O[M1,1],
O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], O[M4,1], Nop11, Nop21, Nop12, J4X4, X4A2,
A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1,
J1J4, M4X4, A1J1}]}

{--> enter Lecture_degrade, args =

proc(fldent) ... end

Tempo3 := [[16740.0], [0, 0, 0, 0, 0, 0], [0, 0, 0, 0, 0, 0]]

a[3, 1, Nop31] := 0
a[3, 1, Nop32] := 0
a[3, 1, O[M1, 1]] := 0
a[3, 1, O[M5, 1]] := 0
a[3, 1, O[M4, 1], O[M4, 2]] := 0
a[3, 1, Nop33] := 0

a[3, 1, 1] := 0
a[3, 1, 2] := 0
a[3, 1, 3] := 0

```

```

a[3, 1, 4] := 0
a[3, 1, 5] := 0
a[3, 1, 6] := 0

```

```

<-- exit Lecture_degrade (now in Diagnosis) = 0}

```

```

{--> enter Regle1, args =

```

```

a_corr := -.007

```

```

a_corr := 0

```

```

unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11,
Nop21, Nop12, Nop31, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1,
A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1}

```

```

result1 := [{O[M2, 1], O[M2, 2]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2],
O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11, Nop21, Nop12, Nop31, J4X4, X4A2, A2X2,
X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4,
M4X4, A1J1}]

```

```

<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1], O[M2,2]}, {O[M1,1],
O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], O[M4,1], Nop11, Nop21, Nop12, Nop31, J4X4,
X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4,
A4J1, J1J4, M4X4, A1J1}]}

```

```

{--> enter Regle2, args =

```

```

as := 0

```

```

unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11,
Nop21, Nop12, Nop31, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1,
A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1}

```

```

result2 := [{O[M2, 1], O[M2, 2]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2],
O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11, Nop21, Nop12, Nop31, J4X4, X4A2, A2X2,
X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4,
M4X4, A1J1}]

```

```

<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1], O[M2,2]}, {O[M1,1],
O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], O[M4,1], Nop11, Nop21, Nop12, Nop31, J4X4,
X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4,
A4J1, J1J4, M4X4, A1J1}]}

```

```

{--> enter Regle1, args =

```

```

a_corr := -.007

```

a_corr := 0

unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11,
Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2,
J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1}

result1 := [{O[M2, 1], O[M2, 2]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2],
O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11, Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2,
A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1,
J1J4, M4X4, A1J1}]

<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1], O[M2,2]}, {O[M1,1],
O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], O[M4,1], Nop11, Nop21, Nop12, Nop31, Nop32,
J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3,
X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1}]}

{--> enter Regle2, args =

as := 0

unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11,
Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2,
J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3}

result2 := [{O[M2, 1], O[M2, 2]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2],
O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11, Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2,
A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1,
J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3}]

<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1], O[M2,2]}, {O[M1,1],
O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], O[M4,1], Nop11, Nop21, Nop12, Nop31, Nop32,
J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3,
X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3}]}

{--> enter Regle1, args =

a_corr := -.007

a_corr := 0

unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11,
Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2,
J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3}

result1 := [{O[M2, 1], O[M2, 2]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2],
O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11, Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2,
A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1,

J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3}}

<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1], O[M2,2]}, {O[M1,1], O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], O[M4,1], Nop11, Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3}]}

{--> enter Regle2, args =

as := 0

unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11, Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3}

result2 := [{O[M2, 1], O[M2, 2]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], O[M4, 1], Nop11, Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3}]

<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1], O[M2,2]}, {O[M1,1], O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], O[M4,1], Nop11, Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3}]}

{--> enter Regle1, args =

a_corr := -.007

a_corr := 0

unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], O[M4, 1], O[M5, 1], Nop11, Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3}

result1 := [{O[M2, 1], O[M2, 2]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], O[M4, 1], O[M5, 1], Nop11, Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3}]

<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1], O[M2,2]}, {O[M1,1], O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], O[M4,1], O[M5,1], Nop11, Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3}]}

{--> enter Regle2, args =

as := 0

unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], O[M4, 1],
O[M5, 1], Nop11, Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2,
X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4,
M4X4, A1J1, A2A3, A3J3, R3M5, M5R3}

result2 := [{O[M2, 1], O[M2, 2]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2],
O[M3, 1], O[M4, 1], O[M5, 1], Nop11, Nop21, Nop12, Nop31, Nop32,
J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3,
X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3, R3M5, M5R3}]

*<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1], O[M2,2]}, {O[M1,1],
O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], O[M4,1], O[M5,1], Nop11, Nop21, Nop12,
Nop31, Nop32, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3,
X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3, R3M5, M5R3}]]*

{--> enter Regle1, args =

a_corr := -.007

a_corr := 0

unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], O[M4, 1],
O[M5, 1], Nop11, Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, Nop33, J4X4, X4A2,
A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1,
J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3, R3M5, M5R3}

result1 := [{O[M2, 1], O[M2, 2]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2],
O[M3, 1], O[M4, 1], O[M5, 1], Nop11, Nop21, Nop12, Nop31, Nop32,
Nop33, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4,
M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3, R3M5, M5R3}]

*<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1], O[M2,2]}, {O[M1,1],
O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], O[M4,1], O[M5,1], Nop11, Nop21, Nop12,
Nop31, Nop32, Nop33, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3,
R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3, R3M5,
M5R3}]]*

{--> enter Regle2, args =

as := 0

unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], O[M4, 1],
O[M5, 1], Nop11, Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, Nop33, J4X4, X4A2,
A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1,
J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3, R3M5, M5R3, R3A4, A4J4}

```

result2 := [{O[M2, 1], O[M2, 2]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2],
O[M3, 1], O[M4, 1], O[M5, 1], Nop11, Nop21, Nop12, Nop31, Nop32,
Nop33, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4,
M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3, R3M5, M5R3, R3A4, A4J4}]

```

```

<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1], O[M2,2]}, {O[M1,1],
O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], O[M4,1], O[M5,1], Nop11, Nop21, Nop12,
Nop31, Nop32, Nop33, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3,
R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3, R3M5,
M5R3, R3A4, A4J4}]

```

```

{--> enter Regle1, args =

```

```

a_corr := -.007

```

```

a_corr := 0

```

```

unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], O[M4, 1],
O[M4, 2], O[M5, 1], Nop11, Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, Nop33,
J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3,
X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3, R3M5, M5R3, R3A4, A4J4}

```

```

result1 := [{O[M2, 1], O[M2, 2]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2],
O[M3, 1], O[M4, 1], O[M4, 2], O[M5, 1], Nop11, Nop21, Nop12,
Nop31, Nop32, Nop33, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1,
A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3,

```

```

R3M5, M5R3, R3A4, A4J4}]

```

```

<-- exit Regle1 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1], O[M2,2]}, {O[M1,1],
O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], O[M4,1], O[M4,2], O[M5,1], Nop11, Nop21,
Nop12, Nop31, Nop32, Nop33, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1,
A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3,
R3M5, M5R3, R3A4, A4J4}]

```

```

{--> enter Regle2, args =

```

```

as := 0

```

```

unfailing := {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2], O[M3, 1], O[M4, 1],
O[M4, 2], O[M5, 1], Nop11, Nop21, Nop12, Nop31, Nop32, Nop33,
J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1, A1R3, R3M3, X4M4, M3R3,
X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3, R3M5, M5R3, R3A4, A4J4}

```

```

result2 := [{O[M2, 1], O[M2, 2]}, {O[M1, 1], O[M2, 1], O[M2, 2],
O[M3, 1], O[M4, 1], O[M4, 2], O[M5, 1], Nop11, Nop21, Nop12,
Nop31, Nop32, Nop33, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1,

```

A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3,
R3M5, M5R3, R3A4, A4J4}]

*<-- exit Regle2 (now in Diagnosis) = [{O[M2,1], O[M2,2]}, {O[M1,1],
O[M2,1], O[M2,2], O[M3,1], O[M4,1], O[M4,2], O[M5,1], Nop11, Nop21,
Nop12, Nop31, Nop32, Nop33, J4X4, X4A2, A2X2, X2J3, J3X1, X1J2, J2A1,
A1R3, R3M3, X4M4, M3R3, X3A4, A4J1, J1J4, M4X4, A1J1, A2A3, A3J3,
R3M5, M5R3, R3A4, A4J4}]}*

Sol := {O[M2, 1], O[M2, 2]}

**Out := {X3A4, A4J1, J1J4, A1R3, R3M3, Nop12, O[M3,1],
O[M2,1], Nop11, O[M1,1], A2X2, X2J3, M3R3,
J2A1, X1J2, J3X1, J4X4, X4A2}**

**ANNEXE 7 : Diagnostic hors-ligne
pour identifier l'origine d'une
dérive du flux ou de la qualité**

Avant d'appliquer la Méthode de l'Arbre des Causes à un centre d'usinage, nous allons d'abord présenter brièvement la démarche de la MAC [Villemeur 88]. Elle comprend les étapes suivantes :

1. Recherche des causes immédiates, nécessaires et suffisantes (INS) ;
2. Classement des événements intermédiaires ;
3. Analyse des défauts de type composant ;
4. Recherche des causes INS jusqu'à l'obtention des événements de base ;
5. Affinement de l'arbre de départ à partir des connaissances acquises sur le système.

Chaque événement de l'arbre est représenté par un des symboles de la Figure 1 ci-dessous.

SYMBOLE	NOM DU SYMBOLE	SIGNIFICATION DU SYMBOLE
	Rectangle	Représentation d'un événement (événement indésirable ou intermédiaire) résultant de la combinaison d'autres événements par l'intermédiaire d'une porte logique
	Cercle	Représentation d'un événement élémentaire ne nécessitant pas de futur développement
	Losange	Représentation d'un événement qui ne peut être considéré comme élémentaire mais dont les causes ne sont pas et ne seront pas développées
	Double losange	Représentation d'un événement dont les causes ne sont pas encore développées mais le seront ultérieurement
 	Triangle	La partie de l'arbre des causes qui suit le symbole  est transférée à l'emplacement indiqué par le symbole 
 	Triangle inversé	Une partie semblable mais non identique à celle qui suit le symbole  est transférée à l'emplacement indiqué par le symbole 

Figure 1 : Représentation événements

A chaque niveau de l'arbre, les événements sont liés au niveau précédent par des portes du type de celles utilisées en logique combinatoire (Figure 2).

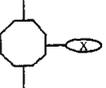
SYMBOLE	NOM DU SYMBOLE	SIGNIFICATION DU SYMBOLE
	Porte OU	L'événement de sortie est généré si l'un au moins des événements d'entrée est présent
	Porte ET	L'événement de sortie est généré si tous les événements d'entrée sont simultanément présents
	Porte OU EXCLUSIF	L'événement de sortie est généré si l'un au moins des événements d'entrée est présent et si la condition est réalisée (i.e. E1 et E2 ne doivent pas être simultanés)
	Porte ET avec condition	L'événement de sortie est généré si tous les événements d'entrée sont présents et vérifient la condition (i.e. E1 avant E2)
	Porte SI	L'événement de sortie est généré si l'événement d'entrée est présent et si la condition X est vérifiée
	Porte DELAI	L'événement de sortie est généré avec un retard de Δt par rapport à l'événement d'entrée à condition qu'il n'ai pas disparu entre temps

Figure 2 : Portes logiques utilisées pour lier les événements.

Pour illustrer le diagnostic hors ligne sur une machine, nous prenons l'exemple d'une machine à commande numérique. Il s'agit du CU60 de Graffenstaden [Toguyeni 92]. C'est un centre d'usinage quatre axes à broche horizontale. Les quatre axes correspondent au positionnement vertical de la broche (axe Y) et au positionnement de la table (axe X, axe Z et axe B). Tous les axes sont entraînés par des moteurs à courant continu. Les mouvements linéaires sont assurés par des vis sans fin. En outre, la broche a un mouvement de rotation par rapport à l'axe Z. L'actionneur est également un moteur à courant continu dont la rotation est transmise à la broche par un système de deux axes parallèles mis en relation par un ensemble baladeur-courroie. La courroie qui transmet le mouvement de l'axe primaire à l'axe secondaire et le baladeur permet de sélectionner une gamme de vitesse. Les pièces à usiner sont transférées sur la table par deux convoyeurs à palettes appelés échangeurs. Ces échangeurs sont actionnés par des vérins hydrauliques disposés en T sous la table. Selon le type de pièce chargée, un outil d'usinage est sélectionné dans le magasin. Ce magasin possède deux mouvements : un mouvement de positionnement angulaire (rotation incrémentale) afin de positionner l'outil dans le plan vertical au fourreau de la broche, et un mouvement de basculement vertical pour charger l'outil. Le positionnement angulaire est réalisé par un moteur à courant continu et le basculement par un vérin hydraulique. La ressource d'usinage de la machine est isolée de l'extérieur par un carénage comprenant un SAS (Système d'Accès et de Sécurité) permettant l'accès des pièces palettisées.

La Figure 3 présente les principaux organes de la machine qui nous intéressent.

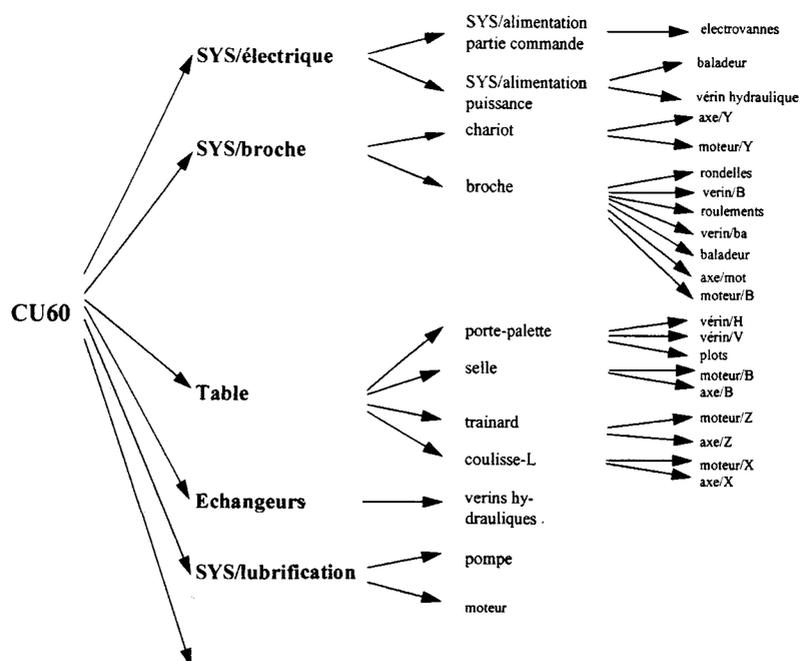


Figure 3 : Principaux organes du centre d'usinage CU60

Le Tableau 1 récapitule les fonctions des principaux organes retenus.

Nom	Désignation	Fonction
CU60	Centre d'usinage	usinage
SYS/électrique	Système électrique	Alimentation des parties commande et puissance de la machine
SYS/broche	Système broche	stockage, positionnement et rotation de l'outil pendant l'usinage
Table	Table servant de support à la pièce usinée	stockage, positionnement et bridage de la pièce
Echangeurs	Porte-palette	convoyeurs à palettes
SYS/lubrification	Système de graissage	lubrification des pièces et outils
Chariot	Support broche	positionnement linéaire de la broche
Broche	Broche	stockage, rotation de l'outil
Porte-palette	Porte-palette	stockage pièce (palette)
Selle	Selle	positionnement angulaire et bridage du porte-palette
Trainard	Coulisse transversale	positionnement linéaire de la selle
Coulisse-L	Coulisse longitudinale	positionnement linéaire du trainard
Vérins hydrauliques	Vérins hydrauliques	bridage des palettes sur la table

Tableau 1

La Figure 4 présente l'arbre des défaillances dans le cas d'une dérive de flux. L'arbre des défaillances d'une dérive de la qualité est compris dans celui-ci étant donné qu'une dérive de la qualité peut être, comme nous l'avons expliqué, source d'une dérive du flux.

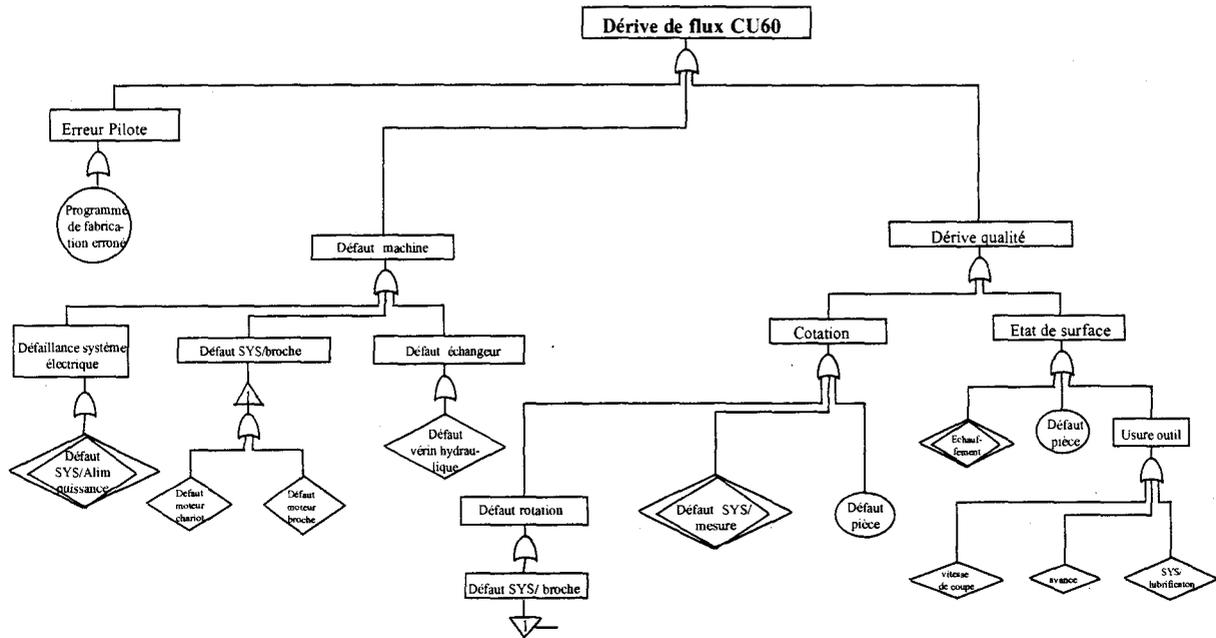


Figure 4 : Arbre des défaillances

[Toguyeni 92]

A.K.A TOGUYENI

Surveillance et diagnostic en ligne dans les ateliers flexibles de l'industrie manufacturière, Thèse de doctorat, Université de Lille 1, novembre 1992.

[Villemeur 88]

A. VILLEMEUR

Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels, Ed. Eyrolles, 1988.

ANNEXE 8 : le contrôle qualité

1. Le contrôle qualité : définition

La Qualité représente “ *l’aptitude d’un produit ou d’un service à satisfaire les besoins des utilisateurs. Les utilisateurs peuvent être des particuliers, des entreprises, des services publics, et sont généralement représentés par le client. Les besoins exprimés ou potentiels, doivent être traduits et formulés en relation avec les différentes étapes nécessaires à la réalisation de la qualité (définition, conception, exécution, emploi). Les composants de la qualité peuvent être notamment : caractéristiques et performances, fiabilité, maintenabilité, disponibilité, durabilité, sécurité d’emploi, caractère non polluant, coût global de possession (débours occasionné à l’utilisateur à partir de l’acquisition jusqu’à la fin de l’utilisation)* ” [AFNOR 83].

Cette définition, à caractère exhaustif, situe les différentes approches de la qualité d’un produit du point de vue de l’utilisateur ainsi que du concepteur.

Dans le cadre des systèmes de production automatisés, la mise en œuvre d’une politique de contrôle qualité doit intervenir à tous les stades de l’élaboration du produit. On distingue globalement trois étapes de contrôle qualité :

- Lors de la conception du produit par une étude détaillée des spécifications du produit permettant notamment de ne pas prendre en compte des exigences qui ne peuvent être contrôlées ou dont les résultats sont aléatoires.
- Lors de la gestion de production dont les actions concernent l’organisation du contrôle qualité ainsi que la détermination des effets du contrôle sur le processus de fabrication et sur la pièce elle-même. Les choix de rebuts, de reprise de pièce et de correction du processus de fabrication y sont étudiés.
- Lors de la fabrication du produit [Bajic 88] : cette phase repose essentiellement sur la qualité des machines de production et des équipements de contrôle mis en jeu. Ceux-ci doivent assurer précision, fiabilité et stabilité dans le temps.

C’est cette dernière étape du contrôle qualité qui nous intéresse dans le cadre de la Surveillance Prédictive Indirecte. En effet, la fiabilité et la stabilité des équipements de production et de contrôle relèvent en grande partie de la responsabilité de la Maintenance. Elle doit les préserver de dérives et d’usures pouvant entraîner une remise en cause du caractère qualité du processus de fabrication. Cela signifie donc la mise en place d’une politique de maintenance qui réponde le mieux possible aux exigences fixées en terme de qualité des produits fabriqués...

Il existe deux types de contrôle qualité en fabrication : le contrôle de l’état de surface, et le contrôle dimensionnel. Nous présentons ici le contrôle dimensionnel. Il requiert des technologies plus complexes, et que nous pouvons par ailleurs retrouver au niveau du contrôle de l’état de surface. Le paragraphe 2 porte sur les différents outils de contrôle qualité, ce qui nous permettra de mieux comprendre la façon dont est abordé le contrôle qualité dans un système automatisé de production, ses principes et ses objectifs. Le paragraphe 3 est réservé à la présentation de la phase d’exploitation des résultats du contrôle qualité. Nous montrerons comment ces résultats peuvent être exploités par la Maintenance en vue d’améliorer la "qualité" de ses services et comment l’approche de la Surveillance

Prédictive Indirecte peut être appliquée à la qualité dans le cadre de notre approche globale de maintenance.

2. Les outils de contrôle qualité [Bajic 88]

Le panorama des outils de contrôle qualité disponibles à l'heure actuelle est très vaste. Il s'étend depuis les tampons et calibres à coulisse jusqu'au système informatisé de visionique.

De nouvelles méthodes et techniques sophistiquées sont développées et entraînent une mutation profonde de l'opération de contrôle qualité. C'est ainsi que le contrôleur en fabrication mécanique a cédé sa place au qualicien de la production automatisée, dont la formation, les méthodes et les moyens reposent principalement sur l'informatique industrielle et l'analyse statistique de données.

La nécessité des contrôles sophistiqués pour des pièces à géométrie complexe, et à des cadences élevées a entraîné le développement de machines de contrôle automatiques et informatisées.

Les systèmes de mesure et de contrôle utilisés en fabrication mécanique remplissent globalement trois fonctions distinctes : la prise de mesure (partie opérative), la commande de l'organe de mesure (partie commande) et l'exploitation des mesures (partie analyse).

La complexité de la partie opérative est très variable suivant les degrés de mobilité de l'organe de mesure. Le volume de la prise de mesure, généralement fonction de la taille de l'objet à contrôler, peut aller de quelques centimètres cubes dans le cas du contrôle de composants électroniques ou micro-mécaniques à plusieurs mètres cube pour le contrôle de la carrosserie d'automobiles. Il est donc parfois nécessaire de déplacer l'organe de mesure dans le champ de mesure. Les déplacements sont réalisés dans les trois directions suivant des axes pilotés par des actionneurs électriques, commandés par des variateurs électroniques.

La fiabilité et la précision des outils qui commandent ou constituent les organes de mesure doivent bien évidemment être sans "faille" grâce à une maintenance appropriée.

Le contrôle qualité peut intervenir à différentes phases de l'élaboration d'un produit et servir différents objectifs :

- Pour garantir la précision de pièces de sécurité ou de mécanique de haute précision par rapport aux spécifications techniques et fonctionnelles posées lors de leur conception, qui sont des conditions sine qua non de vente.
- Pour assurer la qualité finale des pièces fabriquées (contrôle pendant le cycle de fabrication).

Pour répondre à ces deux objectifs, les caractéristiques des outils de contrôle qualité qui sont développés répondent en priorité à l'un ou à l'autre de ces objectifs, rarement aux deux à la fois. Nous nous intéressons aux outils de contrôle qualité en fabrication.

Le contrôle en fabrication

Un des objectifs du contrôle en cours de fabrication est l'utilisation du diagnostic de contrôle pour orienter les pièces dans des cycles de reprise ou de classement par qualité, ainsi que la détection rapide de toute anomalie et dérive de production, pour permettre la correction du processus de fabrication. Le rôle de la Surveillance Prédictive Indirecte est :

- De surveiller les dérives de qualité. Cette observation permet de planifier une date au plus tard d'intervention dans le cadre d'une maintenance en extrapolant les dérives mesurées.
- D'identifier la machine "défaillante" par rapport à une cellule ou à un programme d'usinage au sein de la machine si celle-ci est connue; la mesure de la qualité ne permettant pas d'identifier systématiquement l'origine de la "défaillance".

Les résultats de la Surveillance Prédictive Indirecte permettraient non seulement à la Production de maintenir ses critères de qualité, mais serviraient également à la Maintenance pour améliorer la fiabilité et la précision des équipements de fabrication et de contrôle.

Les systèmes de mesure utilisés doivent être suffisamment rapides pour ne pas pénaliser la durée de fabrication, et pour s'insérer dans la structure automatisée de production en synchronisme avec les autres machines. Il y a trois façons d'effectuer le contrôle en fabrication :

- Effectuer le contrôle sur une machine de production : une jauge de mesure tridimensionnelle est montée en lieu et place d'un outil et permet le palpé de la pièce sur son poste d'usinage. L'analyse par le calculateur de la machine-outil des cotes relevées, permet d'établir la position réelle de la pièce par rapport à la position théorique à laquelle se réfère le programme d'usinage. Des corrections d'usinage peuvent alors être apportées au programme, la machine effectuant ainsi un auto-contrôle et une correction de son usinage.
- Effectuer le contrôle par des robots de mesure : les principales caractéristiques de cet outil sont un haut degré d'intégrabilité, d'automatisation et de flexibilité lui permettant de répondre aux exigences des ateliers modernes de petite et moyenne cadence pour les ateliers flexibles, et de grande cadence pour les chaînes de transfert. Son principe est basé sur le même modèle général (mesure, commande et analyse), mais il dispose en plus d'un organe de communication qui consiste en une unité de dialogue, chargée de la liaison avec l'environnement de l'atelier. Une communication peut donc s'instaurer entre le robot de mesure et le système chargé de l'activité de l'atelier, permettant ainsi de synchroniser aisément le contrôle qualité avec les différentes phases de fabrication, et d'en exploiter les résultats pour suivre ou corriger les processus de fabrication.
- Effectuer le contrôle par la mesure visionique : le principe est, par un contrôle bidimensionnel (projection de l'objet dans le plan de l'objectif) ou tridimensionnel (reconstituer une image 3D à partir de deux images 2D) d'identifier un objet et d'en déterminer les informations métrologiques par des algorithmes d'extraction de contours et de recherche de formes géométriques.

3. Exploitation du contrôle qualité

L'exploitation qui est faite des résultats du contrôle qualité est différente selon que le contrôle est effectué en cours de fabrication ou en fin de fabrication.

En fin de fabrication, les résultats du contrôle des pièces finies sont communiqués au système central de pilotage de l'atelier sous forme de rapport de contrôle. Des procédures de corrections de programmes d'usinage sont alors mises en œuvre afin de maintenir la qualité de fabrication à un optimum. Cette méthode ne représente pas d'intérêt pour la production pour des raisons évidentes d'accroissement du temps global de fabrication (excepté pour la production de pièces de sécurité). Elle peut cependant être intéressante pour la Maintenance qui peut de cette façon caractériser et classer le niveau de qualité du service rendu par les différentes machines du système de production. Les stratégies de maintenance appliquées aux différents équipements peuvent ainsi être corrigées et réajustées si par exemple on connaît pour une production et un type de pièce brute donnée, le temps de fonctionnement au bout duquel on commence à constater une dérive de la qualité. En d'autres termes, la Maintenance se constitue ainsi une base de données informationnelle permettant de faire le lien entre sa politique et celle fixée par la production en matière de qualité.

L'exploitation du contrôle qualité en cours de fabrication a l'avantage de permettre la détection et la correction en temps réel de toute anomalie ou défaut de la pièce ou du processus d'usinage. Si on s'en tient aux procédures de corrections mises en œuvre, elles ne vont que dans le sens du maintien du niveau de la qualité définie au départ. L'état des équipements ayant engendré la baisse de qualité reste le même (nous entendons par là que la ressource dégradée continue d'être exploitée) si le résultat du contrôle qualité n'est pas exploité par la Maintenance pour évaluer en temps réel l'état des ressources. L'intérêt est bien évidemment d'analyser les causes d'une baisse de qualité et de décider le cas échéant du déclenchement ou de la fixation d'une intervention toujours en accord avec les objectifs de qualité de l'entreprise. En effet, les actions de la Maintenance pour améliorer la "qualité" du service rendu par les équipements doivent être justifiées par rapport aux améliorations attendues au niveau de la qualité des produits fabriqués. Par exemple, une meilleure organisation des interventions de maintenance même si elles sont parfois plus fréquentes, peut être adoptée si elle permet d'obtenir des gains de temps et de produire des pièces en quantité et en qualité plus élevées.

[AFNOR 84]

AFNOR, Norme X60-010, 1984

[Bajic 88]

E. BAJIC

Intégration du contrôle qualité en production automatisée : Application à un îlot automatisé de fabrication de pièces mécaniques, Thèse de doctorat, Université de Nancy 1, mars 1998.

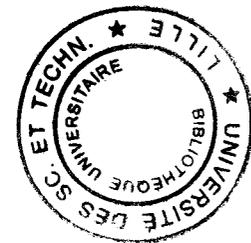
Liste des Figures

Figure 1-1 : Les différents états d'un équipement	15
Figure 1-2 : Les différentes stratégies de maintenance.	20
Figure 1-3 : Exemple de codification	25
Figure 1-4 : Les principaux sous-systèmes du dispositif intégré de maintenance	29
Figure 1-5 : L'équipement, noyau central des données.	29
Figure 1-6 : Activités hors ligne de la Maintenance	32
Figure 1-7 : Activités en ligne de la Maintenance	33
Figure 1-8 : Les différentes activités de la Maintenance	36
Figure 1-9 : Modélisation des activités du Système de Maintenance Prédictive	37
Figure 1-10 : Informations échangées entre la Maintenance Prédictive et le Système de Supervision et de Commande	38
Figure 1-11 : Principale hiérarchie du processus de décision de maintenance.	41
Figure 1-12 : L'algorithme PHADEM pour la décision de maintenance	42
Figure 1-13 : Méthodologie de choix d'une stratégie de maintenance.	43
Figure 2-1 : Le Job shop	49
Figure 2-2 : L'Open shop	50
Figure 2-3 : Gamme opératoire flexible	50
Figure 2-4 : Gamme opératoire non flexible	51
Figure 2-5 : Organisation du Contrôle / Commande selon CASPAIM II	51
Figure 2-6 : Intégration de la Maintenance au Contrôle/Commande d'un SFPM	59
Figure 2-7 : Nouvelle classification des stratégies de maintenance	62
Figure 2-8 : Les différentes fonctions de la Maintenance	65
Figure 2-9 : Les différentes fonctions du Contrôle/Commande d'un SFPM	66
Figure 3-1 : Principe de la Surveillance Prédictive Indirecte	83
Figure 3-2 : Atelier flexible	87
Figure 3-3 : Exemple de graphe	89
Figure 3-4 : Graphe équivalent	90
Figure 3-5 : Positionnement des capteurs	92
Figure 3-6 : Diagramme temporel des différents événements se déroulant pendant la production	93
Figure 3-7 : Système équivalent à M_i et M'_i	96
Figure 3-8 : Gamme opératoire agrégée	99
Figure 3-9 : Principe du diagnostic	100
Figure 3-10 : Notion de dérive induite	102
Figure 3-11 : Jonction	107
Figure 3-12 : Aiguillage	107
Figure 3-13 : Ligne de production à trois machines	108
Figure 3-14 : Influence du flux de M_i sur celui de M_{i-1}	108
Figure 3-15 : Influence du flux de M_i sur celui de M_{i-1}	109
Figure 3-16 : Influence du flux de M_i sur celui de M_{i+1}	109
Figure 4-1 : Atelier flexible	114
Figure 4-2 : Gammes opératoires agrégées des pièces P1, P2 et P3	114
Figure 4-3 : Fonctionnement normal, Taux de dérive = $f(\text{temps})$ pour GO1	121
Figure 4-4 : Fonctionnement défaillant, Taux de dérive = $f(\text{temps})$ pour GO1	122
Figure 4-5 : Fonctionnement défaillant, Taux de dérive = $f(\text{temps})$ pour GO1	123
Figure 4-6 : Fonctionnement défaillant, Taux de dérive = $f(\text{temps})$ pour GO1	123
Figure 4-7 : Fonctionnement normal, Taux de dérive = $f(\text{temps})$ pour GO1	124
Figure 4-8 : Fonctionnement normal, Taux de dérive = $f(\text{temps})$ pour GO2	125
Figure 4-9 : Fonctionnement normal, Taux de dérive = $f(\text{temps})$ pour GO3	125
Figure 4-10 : Fonctionnement défaillant, Taux de dérive = $f(\text{temps})$ pour GO1	126
Figure 4-11 : Fonctionnement défaillant, Taux de dérive = $f(\text{temps})$ pour GO2	126
Figure 4-12 : Fonctionnement défaillant, Taux de dérive = $f(\text{temps})$ pour GO3	127
Figure 4-13 : Fonctionnement défaillant, Taux de dérive = $f(\text{temps})$ pour GO1	127

<i>Figure 4-14 : Fonctionnement défaillant, Taux de dérive = f(temps) pour GO2</i>	<u>128</u>
<i>Figure 4-15 : Fonctionnement défaillant, Taux de dérive = f(temps) pour GO3</i>	<u>128</u>
<i>Figure 4-16 : Paramètres d'une opération</i>	<u>139</u>
<i>Figure 4-17 : Les deux types de machines existant dans un système de production.</i>	<u>139</u>

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Flux d'informations échangés entre les différentes fonctions du Contrôle/Commande sauf la Maintenance	72
Tableau 4.1 : Valeurs nominales des ressources participant à la fabrication de GO ₁	131
Tableau 4.2 : Nombre de pièces présentes sur les convoyeurs	133
Tableau 4.3 : Date de saturation des convoyeurs et Retard de production	133



CONTRIBUTION PAR LA SURVEILLANCE PREDICTIVE INDIRECTE A L'OPTIMISATION DE LA MAINTENANCE DANS LES SYSTEMES FLEXIBLES DE PRODUCTION MANUFACTURIERE

Ce travail présente une nouvelle approche contribuant à l'optimisation de la Maintenance dans les Systèmes Flexibles de Production Manufacturière (SFPM).

Le niveau actuel d'automatisation dans les SFPM et leurs contraintes de production imposent à la Maintenance d'être mieux organisée et de s'appuyer sur des stratégies permettant de garantir la disponibilité et la qualité du service des ressources de production. Le problème qui se pose est alors de définir une politique de maintenance qui sache répondre aux exigences de la production.

Notre contribution est basée sur une démarche en deux temps, s'intéressant à la structuration de la fonction Maintenance puis à la définition d'une stratégie de maintenance préventive basée sur la Surveillance Prédictive Indirecte.

La structuration de la Maintenance a pour objectif d'identifier l'ensemble des fonctions de la Maintenance. Nous avons d'une part identifié les aspects décisionnel, organisationnel et opérationnel de la Maintenance. Nous nous sommes d'autre part intéressés à la définition de ses liens avec les autres fonctions du Contrôle/Commande. Par cette analyse, nous avons montré l'intérêt d'orienter la Maintenance vers une approche en ligne lui permettant de prendre en compte l'évolution du système et de participer aux prises de décisions en temps réel.

Dans la seconde partie, nous proposons de mettre en place une stratégie de maintenance préventive, plus précisément prédictive, par une approche de Surveillance Prédictive Indirecte basée sur le suivi indirect de l'état des ressources par les produits fabriqués.

Le principe de la Surveillance Prédictive Indirecte est de surveiller le flux des produits fabriqués. Un indicateur appelé taux de dérive est défini et permet de caractériser le comportement d'une ressource selon qu'elle fabrique ou transporte une certaine quantité de produits dans les délais fixés, ou qu'elle prend plus de temps pour effectuer l'opération. Un taux de dérive différent de zéro indique une défaillance de la ressource. Des procédures de correction et de maintenance sont mises en œuvre connaissant l'impact réel d'une défaillance sur la production.

Les politiques de maintenance classiques prennent en compte les défaillances catalectiques par une surveillance dite curative, et les défaillances progressives par une surveillance prédictive directe qui consiste à placer des capteurs sur les éléments critiques du système, et à suivre leur état à partir de paramètres significatifs de leur dégradation. C'est le cas par exemple de l'analyse vibratoire, de l'analyse d'usure, etc. Cette méthode de surveillance est facile à mettre en œuvre sur des équipements unitaires. Elle est plus difficile à appliquer à un système car non intégrée en phase de conception ; elle peut être parfois très coûteuse. L'objectif est donc de prendre en compte les défaillances progressives des ressources d'un SFPM par une approche globale de surveillance. Par ailleurs, cette approche permet de répondre à l'acuité des contraintes de production par une stratégie de maintenance plus proche de la Production, sur la base d'un repère commun d'interprétation de l'impact d'une défaillance sur le système.

Mots clés : Surveillance Prédictive Indirecte, Défaillances, Dérive de flux, Maintenance, Détection, Diagnostic, Pronostic.

CONTRIBUTION BY INDIRECT PREDICTIVE MONITORING TO MAINTENANCE OPTIMISATION IN FLEXIBLE MANUFACTURING SYSTEMS

This work presents a new approach contributing to Maintenance optimisation in Flexible Manufacturing Systems (FMS).

The actual evolution of FMS and their production constraints impose to Maintenance to be better organised and to initiate maintenance strategies enabling the satisfaction of production requirements in reliability and availability. Thus, the problem is to define a maintenance policy to satisfy production constraints.

Two steps characterise our contribution in this field : considering first by Maintenance structuring and secondly by the definition of a preventive maintenance strategy based on Indirect Predictive Monitoring.

The first part of the work concerns maintenance structuring. Its objective is to identify the different functions of maintenance. We have first identified the decisional, organisational and operational aspects of Maintenance. Secondly, we have defined its links with the other functions of Control/Command. From this analysis, we have shown the interest for on line Maintenance enabling to take into account the evolution of the system and to participate to real time decision making.

The second part deals with a new approach of Indirect Predictive Monitoring based on the establishing of the resources states from the analysis of the flows of parts manufactured.

The principle of Indirect Predictive Monitoring is to follow the production flow of parts manufactured. A drift rate coefficient is defined and enables to characterise the behaviour of a resource according to the fact that it manufactures or transfers an amount of parts into the delay that has been specified, or takes more time to do the operation. A drift rate different from zero indicates a failure of the resource.

Classical maintenance policies take into account catalectic failures into a curative monitoring, and progressive failures into a direct predictive monitoring. The principle of direct predictive monitoring is to follow the state evolution of critical resources by the main parameters that characterise their degradation. This method can be performed easily on single equipment. It is more difficult to implement on a system because it has not been integrated from the design of the system. Moreover, it is sometimes costly. Thus our objective is to take into account progressive failures of FMS resources by a global approach of monitoring. Moreover this approach enables to face to production constraints by defining a maintenance strategy closer to Production based on a common tool that interprets the real impact of a failure on the system.

Keywords : Indirect Predictive Monitoring, Failures, Production flow deviation, Maintenance, Detection, Diagnosis, Prognosis.