HAL
open science

Contribution à la gestion des perturbations dans les systèmes manufacturiers à contraintes de temps

Anis M'Halla

To cite this version:

Anis M'Halla. Contribution à la gestion des perturbations dans les systèmes manufacturiers à contraintes de temps. Autre. Ecole Centrale de Lille; École nationale d'ingénieurs de Tunis (Tunisie), 2010. Français. NNT : 2010ECLI0008 . tel-00612819

HAL Id: tel-00612819

https://theses.hal.science/tel-00612819v1

Submitted on 1 Aug 2011

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

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

N° d'ordre : 126

ÉCOLE CENTRALE DE LILLE

UNIVERSITÉ DE TUNIS EL MANAR
ÉCOLE NATIONALE D'INGÉNIEURS DE TUNIS

THÈSE

présentée en vue
d'obtenir le grade de

DOCTEUR

en

Automatique et Informatique Industrielle

par

ANIS M'HALLA

DOCTORAT DELIVRÉ CONJOINTEMENT
PAR L'ECOLE CENTRALE DE LILLE ET L'ECOLE NATIONALE D'INGENIEURS DE TUNIS

Contribution à la Gestion des Perturbations dans les Systèmes Manufacturiers à Contraintes de Temps

Soutenue le 12/07/2010 devant le Jury d'Examen composé de :

Rapporteur	Marc BOURCERIE
Rapporteur	Ouajdi KORBAA
Membre	Noureddine ELLOUZE
Membre	Naceur BENHADJ BRAIEK
Membre	Abdellah EL MOUDNI
Co-encadrant	Etienne CRAYE
Directeur	Simon COLLART DUTILLEUL
Directeur	Mohamed BENREJEB

Thèse préparée au Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal de
l'Ecole Centrale de Lille/ Université Lille Nord de France
et à l'Unité de Recherche LARA Automatique de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis
et dirigée par Messieurs S. COLLART DUTILLEUL et M. BENREJEB

Thèse préparée au Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal de
l'Ecole Centrale de Lille/ Université Lille Nord de France
et à l'Unité de Recherche LARA Automatique de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis
et dirigée par Messieurs S. COLLART DUTILLEUL et M. BENREJEB

A ma Mère

A mon Père

A mes frères et sœur

Remerciements

Le travail que nous présentons dans ce mémoire a été effectué dans le cadre d'une thèse en cotutelle entre le Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal (LAGIS) de l'Ecole Centrale de Lille et l'Unité de Recherche LARA Automatique de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis.

Il m'est agréable d'exprimer ma reconnaissance à Monsieur le Professeur Etienne CRAYE, Directeur de l'Ecole Centrale de Lille, Directeur de l'équipe Systèmes à Evénements Discrets (SED) du LAGIS, qui a bien voulu m'accueillir au sein de son équipe. Qu'il trouve ici l'expression de ma gratitude pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux et les conseils éclairés qu'il m'a prodigués.

Je souhaite remercier très vivement Monsieur Simon COLLART DUTILLEUL, Maître de Conférences à l'Ecole Centrale de Lille. Je lui suis sincèrement reconnaissant pour la confiance qu'il m'a témoignée depuis le début et tout au long de la thèse, pour son encadrement, de très haut niveau, ses conseils et ses orientations. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour l'intérêt qu'il n'a cessé de porter à ce travail, pour la disponibilité et le soutien qu'il m'a prodigué. J'espère avoir été digne de cette confiance.

Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur le Professeur Mohamed BENREJEB, Directeur du LARA Automatique, non seulement pour son encadrement de très haut niveau, ses précieux conseils et orientations, mais également pour sa disponibilité et son dévouement. Qu'il sache combien ses conseils perfectionnistes, sa disponibilité et ses encouragements m'ont été d'une grande utilité.

Je remercie Monsieur Noureddine ELLOUZE, Professeur à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, de me faire l'honneur de présider mon jury de thèse.

J'exprime toute ma gratitude à Monsieur Marc BOURCERIE, Professeur à l'Université d'Angers et Monsieur Ouajdi KORBAA, Professeur à l'Institut Supérieur d'Informatique et des Techniques de Communication de Hammam Sousse, pour l'intérêt et l'attention qu'ils ont accordé à ce travail de thèse et d'avoir accepté d'en être les rapporteurs.

Je voudrais également remercier Monsieur Abdellah EL MOUDNI, Professeur à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard et Monsieur Naceur BENHADJ BRAIEK, Professeur à l'Ecole Supérieure de Sciences et Techniques de Tunis, de l'intérêt qu'ils ont porté à ces travaux en acceptant de participer au jury.

Je tiens à porter un grand hommage à Monsieur Nabil JERBI, Maître Assistant à l'Institut Supérieur des Sciences Appliquées et de Technologie de Kairouan, qui a suivi de près mes travaux de recherche.

Enfin, nous ne pouvons que saluer l'esprit d'équipe et de fraternité qui règne entre les chercheurs du LARA Automatique et les chercheurs du LAGIS, qui n'ont cessé de nous apporter leur soutien. Nous adressons à chacun nos remerciements les plus vifs.

Table des matières

Introduction **1**

Chapitre I : Conduite des Systèmes Manufacturiers **5**

I.1 Introduction 7

I.2 Système Automatisé de production 7

I.2.1 Définition 7

I.2.2 Schématisation d'un SAP 8

I.2.3 Objectifs d'un système de production 8

I.2.4 Caractéristiques d'un système de production 10

I.2.5 Les modes de fonctionnement d'un système de production 11

I.3 Etat de l'art sur le contrôle/commande des SFPM 12

I.3.1 Travaux du LAAS, Toulouse 12

I.3.1.1 Structuration du contrôle/commande 12

I.3.1.2 Principaux travaux de surveillance/supervision 14

I.3.1.3 Localisation 15

I.3.2 Travaux du CRAN/LACN, Nancy 15

I.3.3 Travaux du LAI, Lyon 17

I.3.4 Travaux du LAMIH, Valenciennes 19

I.3.5 Travaux de l'université de Carnegie Mellon 21

I.4 Approche LAGIS 22

I.4.1 Architecture générale 22

I.4.2 Planification/Ordonnancement 22

I.4.3 Commande séquentielle 24

I.4.4 Surveillance 24

I.4.4.1 Différents types de surveillance 24

I.4.4.2 Les fonctions de la surveillance 26

I.4.5 La maintenance 27

I.4.5.1 Définitions 27

I.4.5.2 Stratégies de maintenance 28

I.4.5.3 Processus de maintenance 29

I.4.6 Supervision 30

I.4.6.1 Ordonnancement temps réel 30

I.4.6.2 Gestion des modes 30

I.4.6.3 Recouvrement 31

I.4.7 Conclusion 32

I.5 Les systèmes manufacturiers 32
I.5.1 Commande des systèmes à contraintes de temps 33
I.5.2 Surveillance des systèmes à contraintes de temps 34
I.5 Conclusion 36

Chapitre II : Outils de Modélisation des Systèmes à Evénements Discret Intégrant le Temps 37

II.1 Introduction..... 39
II.2 Outils de modélisation orienté commande..... 40
II.2.1 Les RdP autonomes(RdPA)..... 40
II.2.1.1 Règle de fonctionnement..... 41
II.2.1.2 Conflit et parallélisme..... 41
II.2.1.3 Propriétés..... 42
II.2.1.4 Graphes d'Evénements..... 43
II.2.1.5 Conclusion..... 44
II.2.2 RdP temporels..... 44
II.2.2.1 RdP t-temporels..... 45
II.2.2.2 RdP P-temporels 47
II.3 Atelier à contraintes de temps 53
II.3.1 Atelier multi-produits 54
II.3.1.1 Présentation de l'atelier 54
II.3.1.2 Approche classique 54
II.3.2 Atelier de conditionnement de lait 60
II.3.2.1 Structure de l'atelier 60
II.3.2.2 Présentation de la ligne bouteille 62
II.4 Conclusion..... 74

Chapitre III : Commande Robuste des Systèmes Manufacturiers à Contraintes de Temps 75

III.1 Introduction 77
III.2 Décomposition orientée synchronisation 77
III.3 Etude de robustesse des ateliers manufacturiers 79
III.3.1 Définitions 79
III.3.2 Robustesse Passive..... 83
III.3.2.1 Calcul des marges de la robustesse passive locale 83
III.3.2.2 Conclusion..... 92
III.3.3 Robustesse active 92

III.3.3.1 Stratégies de commandes robustes face aux perturbations 93
III.3.3.2 Conclusion 114

III.4 Conclusion 114

Chapitre IV : Surveillance des Ateliers à Contraintes de Temps 115

IV.1 Introduction 117

IV.2 Représentation des incertitudes dans les ateliers manufacturiers à contraintes de temps 118

IV.2.1 Incertitudes et perturbations dans les ateliers manufacturiers 118
IV.2.1.1 Incertitudes dans les ateliers manufacturiers 118
IV.2.1.2 Classification des incertitudes 118

IV.2.2 Représentations des incertitudes dans les ateliers manufacturiers 119

IV.3 Intégration de la robustesse dans le filtrage des comptes-rendus 122

IV.3.1 Introduction 122

IV.3.2 Intégration de la robustesse dans le filtrage des comptes –rendus 123
IV.3.2.1 Génération de symptômes 123
IV.3.2.2 Intégration de la robustesse 124

IV.3.3 Robustesse et filtrage floue des comptes-rendus 125
IV.3.3.1 Généralités sur la logique floue 125
IV.3.3.2 Exemple illustratif 133

IV.3.4 Conclusion…… 135

IV.4 Surveillance d'un atelier de production laitière 135

IV.4.1 Description des différents modules de la structure de surveillance 135

IV.4.2 Module de détection distribuée 139
IV.4.3.1 Définitions et thermologies 139
IV.4.3.2 Principe de la détection distribuée 140
IV.4.2.3 Prise en compte du délai de communication dans la vérification des Contraintes 142
IV.4.2.4 Exemple d'application 145
IV.4.2.5 Application de l'approche de surveillance distribuée à une chaîne de fabrication de lait 146
IV.4.2.6 Conclusion 152

IV.4.3 Module de diagnostic 152
IV.4.3.1 Introduction 152
IV.4.3.2 Classification des méthodes de diagnostic 152
IV.4.3.3 Arbres de défaillances 153
IV.4.3.4 Impact de l'imprécision des taux de défaillances dans un atelier manufacturier de production laitière 154

IV.4.3.5 Conclusion 164

IV.5 Conclusion 165

Conclusion 166
Bibliographie 170

Liste des notations

G	:	Modèle réseau de Petri P-temporel.
P	:	Ensemble fini et non vide de places.
T	:	Ensemble fini et non vide de transitions.
IN	:	Ensemble des entiers naturels.
t°	:	Ensemble des places de sortie de la transition t.
$^\circ t$	:	Ensemble des places d'entrée de la transition t.
p°	:	Ensemble des transitions de sortie de la place p.
$^\circ p$	:	Ensemble des transitions d'entrée de la place p.
m	:	Nombre de places.
n	:	Nombre de transitions.
M	:	Marquage du réseau de Petri.
M_0	:	Marquage initial du réseau de Petri.
$M(p_i)$	:	Nombre de marques dans la place p_i.
W	:	Matrice d'incidence.
S	:	Vecteur caractéristique correspondant à la séquence de franchissements s.
Q	:	Ensemble des nombres rationnels.
Q^+	:	Ensemble des nombres rationnels positifs.
$IS_i=[a_i, b_i]$	:	Intervalle statique de temps de séjour d'une marque dans la place p_i.
T_C	:	Ensemble des transitions commandables.
T_{UC}	:	Ensemble des transitions non commandables.
T_O	:	Ensemble des transitions observables.
T_{UO}	:	Ensemble des transitions non observables.
T_S	:	Ensemble des transitions de synchronisation.
T_{NS}	:	Ensemble des transitions de non synchronisation (transitions simples).
T_P	:	Ensemble des transitions de parallélisme.
R_U	:	Ensemble des places représentant les machines utilisées.
R_N	:	Ensemble des places représentant les machines non utilisées.
$Trans_C$	:	Ensemble des places de transfert chargées ou encore ensemble des places modélisant chacune l'utilisation d'une ressource de transport pour le transfert d'un produit.
$Trans_{NC}$	:	Ensemble des places de transfert non chargées ou encore ensemble des places modélisant chacune un déplacement d'une ressource de transport à vide. Il désigne aussi l'ensemble des places représentant les stocks des pièces non traitées.
q_{ie}	:	Temps de séjour prévu du jeton dans la place p_i, calculé par la couche d'ordonnancement cyclique.
q_i	:	Temps de séjour instantané du jeton dans la place p_i. Il désigne aussi le temps de séjour effectif dans la place p_i lorsque le jeton est tiré. Ce temps de séjour effectif peut être différent de q_{ie}, suite à une perturbation temporelle ou bien suite à une modification des instants de tir des transitions par la commande dans le but de compenser une perturbation.
π	:	Temps de cycle.

$St_e(n)$	:	$n^{ème}$ instant de tir prévu de la transition t.
$St(n)$	:	$n^{ème}$ instant de tir effectif de la transition t.
C_{ms}	:	Ensemble des sous chemins monosynchronisés.
C_{se}	:	Ensemble des sous chemins monosynchronisés élémentaires.
IN(Lp)	:	Nœud d'entrée du chemin Lp.
OUT(Lp)	:	Nœud de sortie du chemin Lp.
δ	:	Perturbation temporelle.
δr_{Lpk}	:	Retard acceptable à l'entrée du sous chemin monosynchronisé Lp_k.
δa_{Lpk}	:	Avance acceptable à l'entrée du sous chemin monosynchronisé Lp_k.
Δrc_k	:	Marge de retard compensable sur le sous chemin monosynchronisé Lp_k.
Δac_k	:	Marge d'avance compensable sur le sous chemin monosynchronisé Lp_k.
Δrt_k	:	Marge de retard transmissible sur le sous chemin monosynchronisé Lp_k.
Δat_k	:	Marge d'avance transmissible sur le sous chemin monosynchronisé Lp_k.
Ca(Lp)	:	Capacité de rejet temporel passif à une avance.
Cr(Lp)	:	Capacité de rejet temporel passif à un retard.
$f_a(p_i)$	:	Marge disponible de commande à l'avance associée à la place p_i.
$f_r(p_i)$	:	Marge disponible de commande au retard associée à la place p_i.
EC(h,m)	:	Ensemble des chemins orientés qui relient le nœud h au nœud m.
CR_i	:	Compte-rendu associé à l'opération A_i.
S_i^1	:	Classe de symptômes de type I.
S_i^2	:	Classe de symptômes de type II.

Introduction

Introduction

Les entreprises de nombreux secteurs d'activité (automobile, sidérurgie, chimie, pétrochimie, ...) sont de plus en plus soumises à la concurrence du marché. Pour assurer leur avenir, les entreprises doivent désormais faire face à différents enjeux socio-économiques ; ce qui les amène une complexité toujours croissante de leurs systèmes de production pour atteindre des objectifs de plus en plus exigeants [KEM, 04]. Sur le plan économique, les coûts de production, le rendement ainsi que le respect des délais sont des facteurs qui influent sur la compétitivité des entreprises. Sur le plan technique, les principales contraintes portent sur la diversité, la flexibilité, la complexité et la qualité des produits. Des développements au niveau des technologies de l'informatique et de l'automatisation deviennent nécessaires.

L'impact de cette mutation dans l'industrie se traduit par la nécessité d'avoir des systèmes capables de s'adapter aux changements de production, de se révéler flexibles et robustes, afin de répondre aux exigences en diversité, en productivité, en qualité, en optimisation des coûts d'exploitation et en la diminution des risques des défaillances.

Cependant, étant donné les différents paramètres influant sur un système de production, ces derniers deviennent très complexes. Cette complexité concerne à la fois la partie commande et la partie surveillance/supervision.

Les travaux proposés s'intéressent à la commande et la surveillance d'une classe particulière de Systèmes de Production : les Systèmes à Événements Discrets (SED) et plus particulièrement les systèmes manufacturiers à contraintes de temps de séjour. Dans ce type d'atelier, à chaque opération est associé un intervalle de temps dont la borne inférieure désigne le temps minimum nécessaire à l'exécution de l'opération. Si le temps accordé à cette opération est inférieur à cette borne, cela signifie que l'opération n'a pas été achevée. La borne supérieure fixe le temps maximum à ne pas dépasser, pour ne pas altérer la qualité des produits fabriqués. Nous supposons que les ressources ont été affectées et que l'ordre des opérations est déjà fixé par la couche d'ordonnancement. Les hypothèses de fonctionnement répétitif avec et sans postes d'assemblage sont considérées.

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres.

Le chapitre I est consacré au positionnement de notre travail dans une architecture de conduite d'atelier manufacturier. Une étude de la commande et de la surveillance est réalisée, en s'appuyant sur les travaux réalisés dans différentes équipes de recherche appartenant à des laboratoires comme le LAMIH (Valenciennes), le LAI (Lyon), le LAGIS (Lille), le LAAS (Toulouse) et l'université de Carnegie Mellon. Toutes ces approches intègrent toute ou partie des différents éléments requis pour la surveillance, la commande et/ou la supervision.
Notre contribution est ensuite mise en évidence au niveau des différents modules de la décomposition fonctionnelle envisagée.

L'outil de modélisation utilisé est décrit au chapitre II. Après la présentation des propriétés fondamentales des RdP autonomes tirées de la littérature scientifique, les réseaux de Petri P-temporels et P-temporels commandés sont développés.

La deuxième partie de ce chapitre s'intéresse aux applications des RdP P-temporels sur les ateliers à contraintes de temps de séjour. Les circonstances ont dirigé ces travaux vers des ateliers en fonctionnement répétitif. Cette restriction n'a pourtant pas de justification théorique directe.

La troisième partie de ce chapitre, s'intéresse au problème de transformation d'un graphe d'événement valué (GEV) en un graphe d'événement (GE). Nous proposons une application d'une méthode de transformation du GEV, basée sur un algorithme proposé dans [NAK, 99], à un atelier de production laitière. Cette transformation permet ensuite d'appliquer les résultats classiques concernant les systèmes de production à contraintes de temps.

Le chapitre III est entièrement consacré à l'étude de la robustesse des ateliers manufacturiers à contraintes de temps. La robustesse est abordée avec et sans modification de la commande, face aux perturbations temporelles. Une axiomatique rigoureuse a été développée pour la caractérisation analytique de ces deux propriétés. Nous proposons alors trois stratégies de commande robuste face aux perturbations temporelles. La première consiste à générer par la commande un décalage temporel de même nature que la perturbation afin d'éviter la mort de marques aux niveaux des transitions de synchronisation du modèle réseau de Petri P-temporel. La deuxième se propose de rejeter la perturbation dès son observation en agissant sur la commande. Enfin, la troisième est une synthèse des deux précédentes.

Le chapitre IV commence par présenter la problématique des incertitudes dans les systèmes de production manufacturière. Nous distinguons l'incertitude sur les ressources et l'incertitude sur les opérations.

Notre contribution dans ce cadre porte sur l'intégration des résultats concernant la robustesse dans la génération de symptômes et la classification des comptes rendus associés aux différentes opérations en utilisant la logique floue.

Dans la troisième partie de ce chapitre, nous présentons en détail la démarche à suivre pour la mise en œuvre d'un modèle de surveillance. A partir du modèle qui définit les fonctions des différents éléments du procédé et leurs interactions, nous construisons un module de détection capable de détecter toute violation des spécifications de bon fonctionnement du système surveillé de manière locale ou de manière distribuée. L'outil proposé pour la détection est la chronique. Le module de détection communique avec un module de diagnostic permettant de collecter des informations destinées à la supervision, telles que l'état défaillant du système et les causes de la défaillance. L'outil utilisé pour le diagnostic est l'arbre de défaillance flou.

Cette démarche sera appliquée à un exemple, celui d'un atelier de production laitière.

Nous terminons ce mémoire par une conclusion, dans laquelle nous montrons l'apport de ce travail dans le domaine de la commande et la supervision des systèmes de production. Quelques perspectives seront présentées notamment pour compléter le modèle global de surveillance et de supervision.

CHAPITRE I :

Conduite des Systèmes Manufacturiers

Chapitre I

Conduite des Systèmes Manufacturiers

I.1 Introduction

Le présent chapitre cherche à situer la contribution de ce mémoire par rapport à une architecture de conduite de Système Automatisé de Production (SAP). Nous commençons par présenter les caractéristiques d'un SAP suivant différents points de vue.

La deuxième partie présente de manière générale la problématique de commande et de surveillance dans le domaine manufacturier. Une étude de la structure de commande/ surveillance est réalisée en s'appuyant sur les travaux réalisés dans différentes équipes de recherche appartenant à des laboratoires comme le LAMIH (Valenciennes), le LAI (Lyon), le LAGIS (Lille), le LAAS (Toulouse) et l'université de Carnegie Mellon. Toutes ces approches intègrent toute ou une partie des différents éléments requis pour la surveillance et la commande. Cette partie s'achève sur une étude de l'approche développée au LAGIS, notre contribution est ensuite mise en évidence au niveau des différents modules de la décomposition fonctionnelle envisagée.

I.2 Système Automatisé de production (SAP)

I.2.1 Définition

Commençons par définir les systèmes automatisés de production [BON, 93] :

"Tout système de production a pour objectif de transformer, sous certaines conditions, un élément initial en un élément final, afin que sa valeur, par rapport à certains critères, soit augmentée".

L'utilisation de ces systèmes dans le milieu industriel doit répondre à des objectifs imposés et peut être sujette à des dysfonctionnements. La compétitivité à l'échelle mondiale impose aux SAP d'être de plus en plus performants tant au niveau de leur conception que de leur exploitation. Pour cela, les cadences de production doivent être augmentées, les temps de maintenance réduits, et les systèmes flexibles pour s'adapter rapidement à la production de nouveaux produits [MAR, 08]. La productivité est liée entre autres à la qualité de la commande. Si celle-ci n'est pas sûre et robuste, elle peut entraîner des aléas de fonctionnement aux conséquences fâcheuses pour la sécurité des hommes et des équipements.

La tendance actuelle s'oriente vers des systèmes produisant des petites et moyennes séries capables de s'adapter aux changements de production, afin de répondre aux exigences de diversité, de productivité et de qualité, exigées par la concurrence actuelle du marché. Ces systèmes, appelés Systèmes Flexibles de Production Manufacturière (SFPM) se situent parmi les SAP. Les SFPM sont un compromis entre, d'une part les lignes de transfert automatisées à très haute productivité, mais conçues pour des productions de grande série, et d'autre part des

installations manuelles à très faible automatisation permettant une production unitaire. Leur but est de fabriquer et de transformer une matière première en produit fini ou semi-fini.

I.2.2 Schématisation d'un SAP

Un système est un ensemble d'éléments en interaction organisé dans un environnement avec lequel il interagit pour réaliser une fonction qui lui est attribuée. De manière générale, un SAP est constitué de deux parties essentielles (figure I.1):

- La partie commande : qui assure l'envoi des ordres vers la partie opérative et permet la communication avec l'opérateur.

- La partie opérative : qui transforme d'une part à partir des ordres envoyés par la partie commande, la matière d'œuvre en lui additionnant une valeur ajoutée, et d'autre part renvoie un compte-rendu à la partie commande.

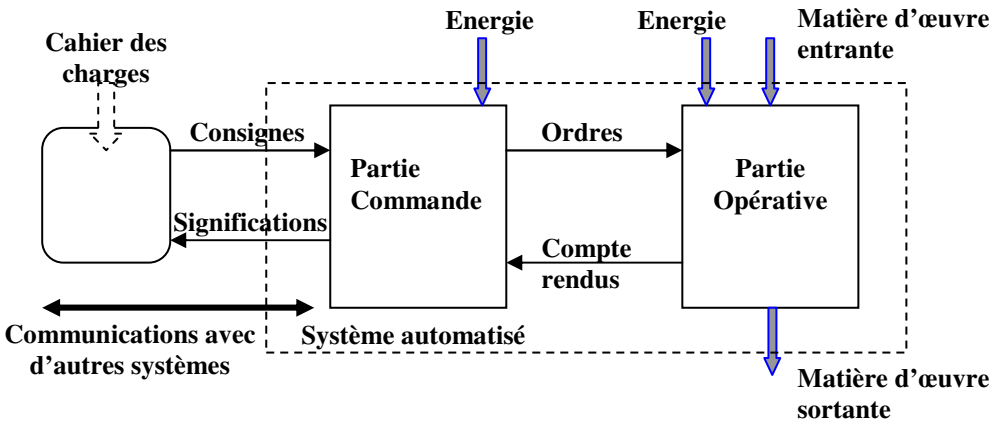


Figure I.1 : Structure et informations échangées dans un SAP [THE, 05]

La caractérisation d'un SAP peut se faire selon trois points de vue, utilisant des outils différents [PER, 06] :

- Soit par la fonction à assurer qui exprime le besoin que le système doit satisfaire.

- Soit par la structure qui exprime le lien entre les différents composants matériels ou/et logiciels.

- Soit par la dynamique qui exprime le fonctionnement du système, c'est-à-dire la succession de mouvements, transformations à effectuer.

I.2.3 Objectifs d'un système de production

Aujourd'hui, l'entreprise est confrontée à des changements importants et quotidiens mettant les systèmes de production face à des contraintes et enjeux, figure I.2, qui ont généré une importante mutation de la fonction production [DHO, 05].

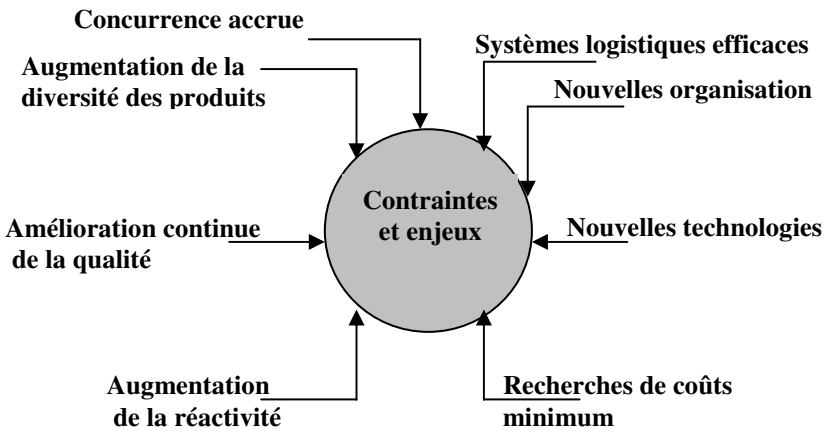


Figure I.2 : Contraintes et enjeux [DHO, 05]

Les systèmes industriels actuels doivent assurer une meilleure productivité avec un coût moins élevé. Les automaticiens doivent donc concevoir des systèmes de plus en plus flexibles permettant un changement rapide de la production et des temps d'arrêt (entretien, maintenance) de moins en moins longs. Les SAP doivent donc répondre à des objectifs économiques, humains, techniques, et de pilotage :

- les objectifs économiques s'intéressent aux bénéfices financiers de l'entreprise et portent sur la diminution des coûts de fabrication et des stocks,

- les objectifs humains s'intéressent à améliorer les conditions de travail de l'opérateur. En effet, les systèmes de production contiennent souvent des tâches dangereuses, répétitives, pénibles, et l'automatisation tente de réduire l'intervention humaine de ces tâches,

- les objectifs techniques sont liés à la conception et à la transformation des processus de production. Les recherches portent sur :

  - la diminution de la durée du cycle de production en prenant en compte les durées administratives, d'approvisionnement, de transformation…,

  - l'augmentation de la qualité des produits en assurant le niveau de qualité attendu par le client tout au long de la production,

  - l'augmentation de la flexibilité, en permettant au système de s'adapter à un changement de production,

  - l'augmentation de la disponibilité du système de production en diminuant entre autres les temps de maintenance.

- les objectifs de pilotage s'intéressent à la maîtrise des coûts de production et de stockage et à l'amélioration des temps de réaction en cas de perturbation.

I.2.4 Caractéristiques d'un système de production

Pour produire efficacement, l'entreprise doit être dotée d'un système de production ayant de nouvelles caractéristiques, telles que la flexibilité, la réactivité, la proactivité et la robustesse, figure I.3. Les lignes qui suivent précisent ces mots clés.

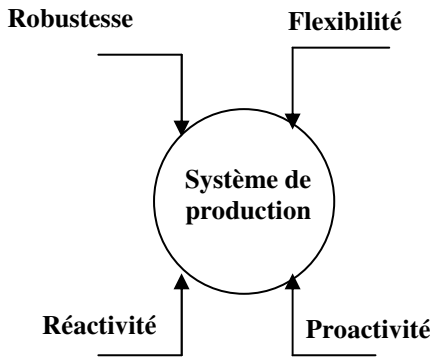


Figure I.3 : Caractéristiques d'un système de production

- **Flexibilité**

Il existe plusieurs définitions de la flexibilité suivant que l'on s'intéresse, par exemple, à la capacité du système de fabrication à s'adapter à des variations de la demande (flexibilité décisionnelle du système de gestion [BRI, 98] ou à des aléas de fonctionnement des ressources (flexibilité physique de l'atelier. La flexibilité physique correspond à la possibilité de modifier ses caractéristiques fonctionnelles afin d'accepter la fabrication de nouvelles variantes de produits anciens ou de nouveaux produits.

L'objectif de ce type de flexibilité est d'offrir aux clients une grande variété de produits en utilisant les mêmes ressources matérielles.

- **Réactivité**

La réactivité d'un système de production est définie comme son aptitude à répondre (réagir) dans un temps requis aux changements de son environnement interne ou externe par rapport au régime de fonctionnement [DHO, 05]. Ces aléas proviennent, soit du système de production (panne de machines, rebuts, non-conformité du produit, …), soit de son environnement.

- **Proactivité**

Aujourd'hui, l'évolution rapide de l'environnement et la complexité croissante des processus de production conduisent à considérer comme nécessaire une adaptation permanente, dans un monde où les aléas constituent la règle et non l'exception. La réactivité est donc nécessaire, mais elle n'est pas suffisante et les systèmes de production doivent présenter une nouvelle propriété : la proactivité.

La proactivité d'un système de production est définie comme sa capacité à anticiper les changements d'état, à adapter ses règles de fonctionnement et à se réorganiser.

- **Robustesse**

Dans la littérature, différentes définitions de la robustesse ont été proposées. Chaque définition répond à un objectif donné dans un domaine donné. Ainsi dans le domaine des statistiques, la robustesse est caractérisée comme étant une insensibilité à toutes les dérives par rapport aux hypothèses [HUB, 81]. En recherche opérationnelle, dans le contexte d'aide à la décision, B. Roy [ROY, 97], propose le concept de conclusion robuste qui vise à élaborer des éléments de réponse à un problème auquel est confronté un décideur en tenant compte des incertitudes sur les paramètres du problème.

D'un point de vue conception d'un produit, la robustesse se mesure par l'insensibilité relative de ses performances fonctionnelles face aux déviations des spécifications lors de la fabrication. En ce qui concerne la conception du système, la robustesse est caractérisée par l'ajustement des paramètres du système, afin de garantir un niveau de performance acceptable.

La robustesse d'un système de fabrication peut être définie comme étant sa capacité à préserver certaines propriétés d'intérêt face à des perturbations [COL, 07].

I.2.5 Les modes de fonctionnement d'un système de production

Un système est par définition un ensemble susceptible d'évoluer dans le temps. Il est composé d'un ensemble d'éléments interagissant entre eux et avec l'extérieur, réunis pour assurer une mission [RAY, 04]. Suivant le mode de fonctionnement sous lequel le système évolue, la mission pour laquelle le système a été conçu peut être totalement remplie, partiellement remplie ou non remplie. Les modes de fonctionnement sont de différents types comme le montre la figure I.4.

- Les modes de fonctionnement «normaux»: Ils regroupent le mode de fonctionnement nominal qui doit être, en principe, en parfaite adéquation avec la qualité de la mission.

- Les modes de fonctionnement «anormaux»: Lorsque le système est dans ce mode, la mission peut être partiellement remplie ou non remplie; en tout état de cause, le service n'est pas satisfaisant. Ces modes peuvent être décomposés en :

  - modes interdits : ce sont des modes sous lesquels le système ne doit absolument pas fonctionner pour des raisons de sécurité,
  - modes défaillants : ils correspondent à de mauvais fonctionnement du système. Un sous-ensemble de ces modes est constitué des modes de pannes où un sous-ensemble du système voire le système complet ne fonctionne plus,
  - modes dégradés : ils correspondent à l'accomplissement de la mission soit de façon partielle, soit avec des performances moindres,
  - modes critiques : ce sont des modes pour lesquels le système présente des caractéristiques de fonctionnement très particulières et souvent non souhaitées.

- Les modes de fonctionnement «d'exception» : ce sont des modes qui peuvent être normaux ou anormaux mais qui ont la caractéristique d'être peu tolérés ou peu fréquents.

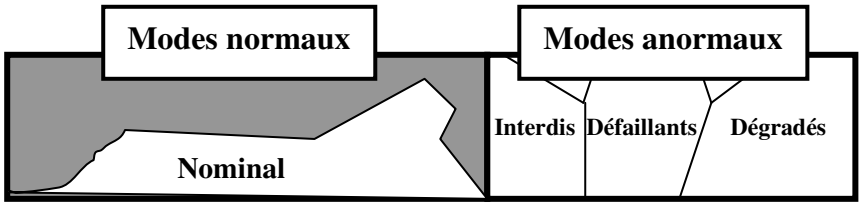


Figure I.4 : Classifications des modes de fonctionnement [RAY, 04]

I.3 Etat de l'art sur le contrôle/commande des SFPM

Les approches de surveillance/supervision des Systèmes Flexibles de Production Manufacturière (SFPM) sont principalement développées en France. La plus part de ces méthodes ont pour origines les travaux effectués au LAAS à fin des années 80. Elles sont caractérisées par la définition d'un cadre fonctionnel de la supervision et plus généralement du contrôle/commande : surveillance, gestion des modes, pilotage et reconfiguration. Ces fonctions sont souvent conçues à partir de modèle Réseaux de Petri (RdP) ou à base de connaissances (techniques d'intelligence artificielle). Dans la suite de cette partie, nous présentons un certain nombre d'approches pour la conclure avec l'approche développée au LAGIS.

I.3.1 Travaux du LAAS, Toulouse

I.3.1.1 Structuration du contrôle/commande

L'objectif des travaux développés au LAAS est la conception d'une architecture de contrôle/commande modulaire, hiérarchique et distribuée pour les SFPM (figure I.5). Ces caractéristiques sont imposées par la complexité (en nature et en taille) des systèmes à modéliser. Ainsi dès 1987, A.E.K.Sahraoui proposait une structuration du contrôle/commande autour des fonctions de commande et de surveillance [SAH, 87], [SAH, 92]. Dans l'approche proposée, la surveillance était initialement structurée en trois fonctions :

- La détection qui est intégrée à la commande. Elle utilise la technique du chien de garde pour détecter toute violation de la commande par rapport à l'ordonnancement prévisionnel.

- Le diagnostic qui est basé sur des règles d'inférences. Il permet d'identifier les causes des défaillances.

- La décision/reprise qui utilise également des techniques d'intelligence artificielle. Son rôle est de déterminer la manière de réagir aux défaillances. Lorsqu'elle est automatisée, cette réaction va s'appuyer sur des procédures de reprise prédéfinies, intégrées à la commande :

  - L'interface opérateur,
  - Les procédures d'urgence.

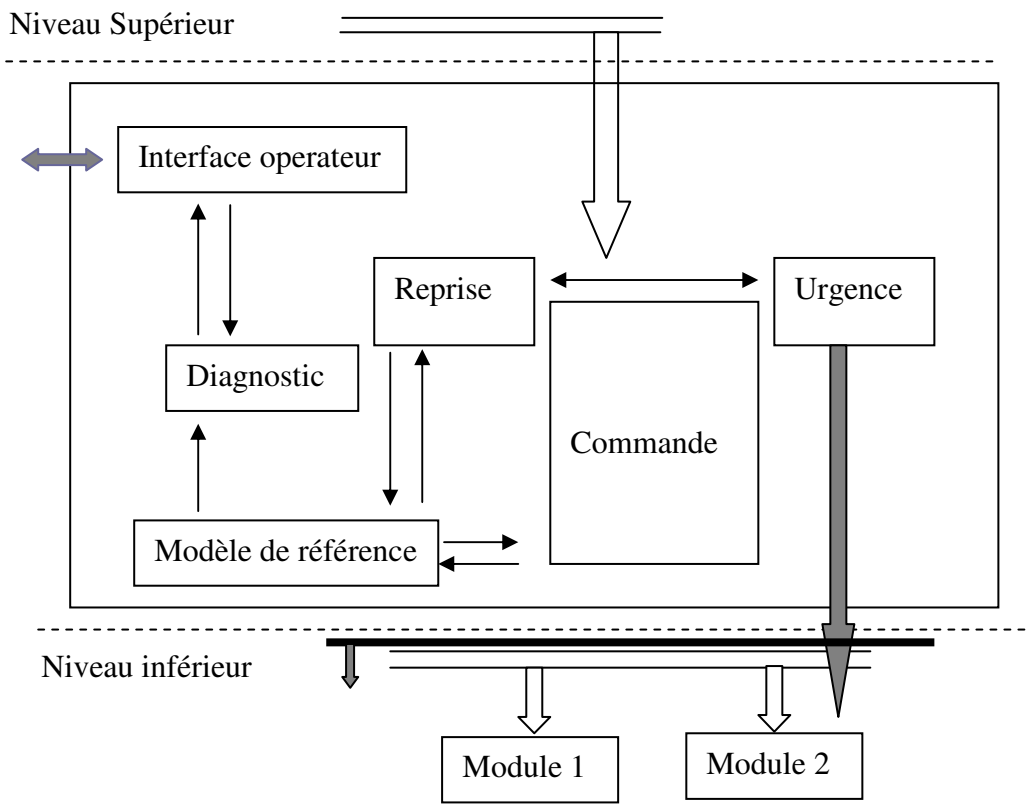


Figure I.5 : Structuration du contrôle/commande vue par le LAAS/OCSD [COM, 91]

A partir de 1991, cette architecture initiale va être complétée par l'introduction d'une fonction intermédiaire entre la surveillance et la commande : le module de référence. Il est bâti sur le modèle de référence qui représente le comportement normal du procédé, prenant en compte ses flexibilités potentielles uniquement restreintes par certaines contraintes de fonctionnement (contraintes de coopération, de synchronisation ou d'exclusion mutuelle).

En fonctionnement normal avant chaque requête, la commande interroge le module de référence afin d'en vérifier l'adéquation vis-à-vis des contraintes du procédé. Après émission d'un ordre, elle se met alors en attente d'un compte-rendu d'exécution. En cas de réception conforme (vis à vis d'une fenêtre temporelle) de ce compte-rendu, l'information est transmise au module de référence pour mettre à jour l'image du procédé qu'il maintient. La commande et le module de référence évoluent alors en parallèle. Dans le cas contraire, un symptôme est détecté et seul le modèle de référence est mis à jour. Ainsi, il constitue une véritable base de données qui va être exploitée par le diagnostic et la décision en cas de défaillance.

Les travaux de A. Chaillet-Subias [CHA, 95] et E. Zamai [ZAM, 97] permettent par ailleurs de préciser le système d'information à mettre en œuvre afin de permettre l'intégration des différentes fonctions dans un contexte hiérarchisé.

Remarque

Nous n'étudions pas la reprise, la distribution notamment, nous amène à envisager une interface de supervision à un point de vue plus élevé que celui de l'opérateur.

I.3.1.2 Principaux travaux de surveillance/supervision

I.3.1.2.1 Distribution de la fonction détection

Pour aborder ce problème de la détection dans une architecture distribuée, la solution proposée dans [BOU, 05], repose sur deux points principaux :

– Le modèle sur lequel s'appuie la détection pour détecter un symptôme est un modèle temporel, de signature temporelle du comportement du système surveillé. Cette signature appelée chronique [DOU, 94] est définie comme un ensemble d'événements et un ensemble de contraintes temporelles entre ces événements. Une contrainte est une relation impliquant une durée entre deux événements. Plusieurs types de contraintes ont été pris en compte :

  - contraintes de précédence : ce type de contrainte exprime qu'un événement précède un autre événement,
  - contrainte de type intervalle : dans ce cas la contrainte exprime le fait que la durée séparant l'occurrence de deux événements doit être comprise dans un intervalle donné [d_{AB}, f_{AB}],
  - contrainte de type fenêtre d'admissibilité : ce dernier type de contrainte permet de représenter le fait que la durée séparant l'occurrence d'un événement de celle du dernier événement d'un ensemble d'événements donné, doit être comprise dans un intervalle fixé.

Dès lors, la détection s'appuie sur l'observation de cette signature temporelle. Le principe de la détection, figure I.6, est donc de vérifier que chaque événement observé est cohérent vis-à-vis de la chronique spécifiée compte tenu des contraintes temporelles [BOU, 06]. Si la chronique est un modèle de fonctionnement normal, toute déviation observée c'est à dire toute violation de contrainte temporelle conduit à la détection d'un symptôme de défaillance. Dans le cas contraire où la chronique est un modèle de fonctionnement défaillant, la vérification d'une contrainte temporelle permet la détection d'un symptôme de défaillance.

– Les systèmes traités sont des systèmes à événements discrets, physiquement distribués. L'architecture de surveillance est donc une architecture distribuée, basée sur des modules ou sites de surveillance communicants. Chaque site est associé à un sous système physique en provenance duquel il reçoit un ensemble d'événements et est pourvu d'une fonction détection. La détection de défaillance concernant l'ensemble des sites de surveillance est donc une détection globale, obtenue à partir de la coopération de fonctions de détection locales et n'est pas une simple répartition de la fonction détection sur différents sites isolés.

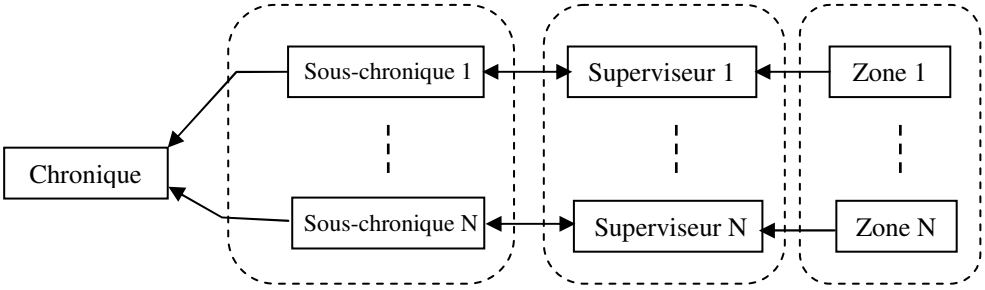


Figure I.6 : Principe de la détection distribué

I.3.1.2.2 La distribution du modèle du procédé

En abordant le thème de la surveillance distribuée, il apparaît nécessaire de considérer le problème des modèles utilisés et plus particulièrement de la répartition de ces modèles sur les différents sites de surveillance. Ce problème peut être abordé en considérant comme point de départ un modèle global et en s'intéressant alors à la distribution de ce modèle [SIL, 03a] [SIL, 03b].

Un des objectifs du travail de Da Silveira [SIL, 03a] était de proposer une méthode de transformation des modèles centralisés de commande/surveillance dans une structure modulaire hiérarchique. Ces travaux tournés principalement sur le modèle du procédé, proposent la mise en place d'une procédure systématique de distribution des modèles centralisés et d'un protocole de communication pour garantir la cohérence entre les données.

- La procédure de distribution assure que chaque partie du processus de contrôle et supervision a au moins les mêmes propriétés que le modèle centralisé. Un sous-modèle réseau de Petri est associé à chaque ressource mais il n'y a aucune restriction pour décrire le comportement de plusieurs ressources avec un seul sous-modèle. La méthode de distribution s'appuie sur la théorie des invariants linéaires pour obtenir l'ensemble des places et l'ensemble des transitions c'est à dire le sous-modèle, décrivant le comportement d'une ou d'un ensemble de ressources et ses interactions avec les autres ressources.

- Le protocole de communication proposé impose des règles aux niveaux des communications intermodules. Lorsqu'une activité requiert des ressources contrôlées par différents modules, ces communications doivent permettre aux modules de mettre à jour leurs données et de synchroniser leurs actions. Ce protocole doit permettre de détecter toute incohérence de données pouvant mener à un conflit décisionnel ou opérationnel.

I.3.1.3 Localisation

L'architecture distribuée proposé ici semble prometteuse pour les ateliers à contraintes de temps. Des architectures génériques de supervision, intégrant des capacités de diagnostic et de pronostic, permettant de connaître l'état actuel et l'état futur des systèmes complexes ont été élaborés [RIB, 09]. Cet aspect est abordé dans ce mémoire. En effet, nous allons traiter le problème d'intégration de la robustesse dans la surveillance/supervision des ateliers à contraintes de temps. Une utilisation des chroniques telles que proposée par Boufaied sera présentée sur un atelier agroalimentaire, sortant du cadre applicatif que ce dernier avait envisagé.

I.3.2 Travaux du CRAN/LACN, Nancy

Comme le LAAS, les travaux du CRAN concernent surtout la formalisation du concept de surveillance dans le cadre du contrôle/commande des SFPM. L'approche du CRAN, Figure I.7, rejette le schéma bloc fonctionnel caractérisé par une vision atomique de l'interface Partie Opérative/Partie Commande (PO/PC), et propose d'appréhender cette interface avec une vision moléculaire. Elle est constituée autour de la notion d'éléments de la partie Opérative (E.P.O). Cette dernière est vue alors comme un ensemble d'E.P.O.

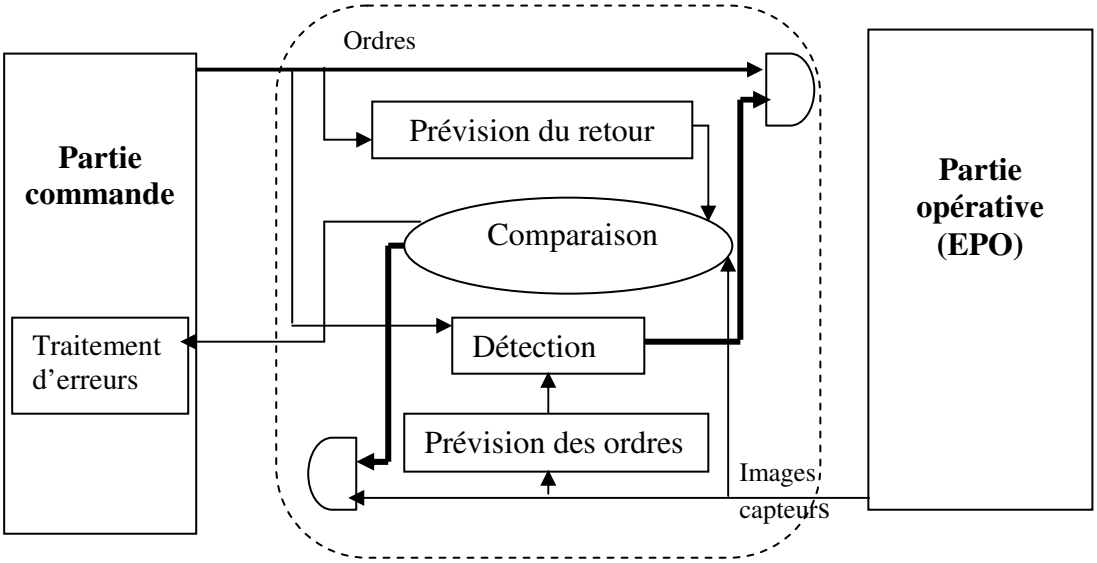


Figure I.7 : Surveillance par prévision du comportement

Le comportement d'un E.P.O est caractérisé par des états en nombre fini : des états physiques stables et des états transitoires. La modélisation consiste à identifier ces états, et à les organiser afin de caractériser l'évolution des caractéristiques observables par rapport aux ordres de la commande. Le modèle comportemental est un automate à états finis; cette modélisation concerne le fonctionnement nominal de la partie opérative. Le modèle comportemental peut être utilisé de deux manières différentes : en émulateur ou en filtre.

Cette approche est basée sur l'utilisation d'un modèle de comportement normal de chaque E.P.O. Chacun de ces modèles est utilisé en tant que filtre de commande, leurs rôles consistent à vérifier d'une part que les requêtes issues de la commande sont cohérentes vis à vis de l'état courant modélisant les E.P.O et d'autre part que les comptes rendus reçus correspondent bien à ceux générés par le module de prévision. La notion de filtre apporte beaucoup en fiabilité et sécurité.

Plus récemment, les travaux de D. Gouyon [GOU, 04] ont proposé une approche mixte intégrant des techniques mais également de la synthèse de commande. Ces travaux sont basés sur le concept d' «agile manufacturing ». L'idée est de décomposer la commande selon deux points de vue : celui des ressources de production et celui des produits. Les produits selon leurs besoins vont solliciter des opérations des ressources.

On ne peut évoquer les travaux du CRAN sans préciser les travaux de recherche développée au sein du groupe thématique Sûreté de fonctionnement et diagnostic des systèmes (SURFDIAG) permettent d'avoir une approche globale de la conception et de l'exploitation (surveillance, maintenance, reconfiguration) des systèmes industriels complexes automatisés. La problématique de la sûreté de fonctionnement se décompose en différents sous-problèmes. Il faut tout d'abord, lors de sa conception, garantir la sûreté du système, c'est-à-dire garantir qu'il fonctionnera selon un cahier des charges donné (en fonctionnement normal) et prévoir également différents modes de repli permettant au système de fonctionner (ou de se placer dans un état sûr), même si une partie des fonctions n'est plus assurée. Il faut ensuite, en exploitation, surveiller le fonctionnement du système pour :

- détecter un défaut, c'est-à-dire décider que le fonctionnement n'est pas normal en utilisant toute l'information disponible sur le comportement réel (observé au travers de mesures) et attendu (le plus souvent prédit par un modèle du système lui même ou des données le décrivant),

- localiser le défaut, c'est-à-dire décider quel composant (ou, au moins, quelle fonction) est défaillant en utilisant la redondance des informations disponibles,

- combattre les effets des défauts, c'est-à-dire mettre en œuvre une commande qui tolère ce défaut (éventuellement en dégradant les objectifs à atteindre) ou reconfigurer l'architecture de la commande voire celle du système lui-même lorsqu'on dispose de suffisamment de degrés de liberté.

Localisation

Dans le quatrième chapitre, les problèmes de surveillance, de sûreté des ateliers manufacturiers à contraintes de temps sont faites de façon séparée.

Nos travaux contribuent à la fonction de surveillance par des résultats concernant la détection et la localisation des défaillances dans un atelier de production laitière. Pour ce type d'atelier, la qualité des produits fabriqués et de la production sont surveillées.

Une évaluation quantitative de la sûreté de fonctionnement (SdF) est abordé dans le quatrième chapitre. Il s'agit, en particulier, d'évaluer de façon probabiliste des paramètres de sûreté de fonctionnement d'un système à contrainte de temps. Ces problèmes se placent résolument dans le cadre de la fiabilité.

I.3.3 Travaux du LAI, Lyon

Les travaux du Laboratoire d'Automatique Industrielle (LAI) de Lyon concernent l'étude, l'analyse, la commande des Systèmes à Evénements Discrets sujets à des perturbations. Basés sur la théorie des automates, ces travaux permettent de basculer d'un fonctionnement nominal à un fonctionnement dégradé, face aux perturbations. La répartition fonctionnelle envisagée pour la conduite des systèmes manufacturiers est donnée par la figure I.8. L'axe de subsidiarité définit le niveau d'abstraction et de responsabilité.

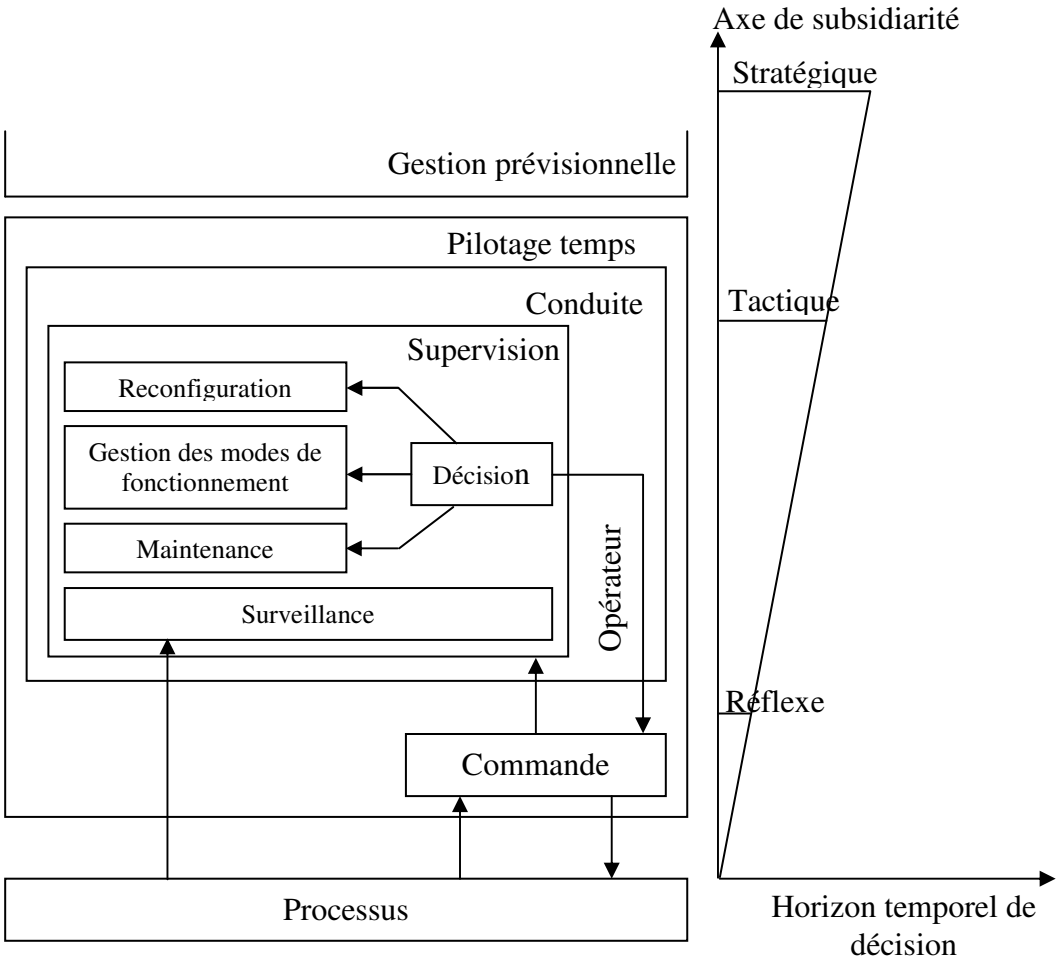


Figure I.8 : Structure fonctionnelle de la conduite [NIE, 02]

Dans cette structure, le pilotage temps réel d'un système intègre hiérarchiquement les niveaux réactifs de conduite et de commande. La conduite est distinguée explicitement de la commande. A la commande, qui est fonctionnellement la plus proche du procédé, est attribué le pouvoir ultime de faire appliquer les requêtes (ordres) sur les équipements et d'en recueillir les informations qui témoignent de leur exécution (comptes rendus). Elle présente de ce fait, une réactivité de type réflexe. La conduite intègre, au-delà de la commande, les modules complémentaires nécessaires à une réactivité plus élaborée prenant en compte une image plus globale de la situation courante et de ses enjeux. A ce stade, les moyens de supervision, de surveillance et de maintenance matérialiseront la réactivité du système à son environnement. La supervision représente les moyens fonctionnels de la conduite qui dans de nombreux cas industriels sont associés aux opérateurs humains-pilotes de ligne. Les actions réflexes, tactiques et/ou stratégiques liées à l'ampleur des reconfigurations envisagées apparaissent ainsi selon l'échelle de temps considérée et le pouvoir décisionnel courant [NIE, 02].

La réactivité face à une défaillance, figure I.9, est basée sur le principe de la commande par supervision. Le principe de cette approche est fondé sur la détection, la localisation des dérives comportementales du procédé et la compensation des défaillances apparues en vue de maintenir le système en état de fonctionnement.

Durant la période de compensation, le système fonctionne en mode dégradé. Ce mode de fonctionnement débute dès l'apparition de la dérive jusqu'à la phase de reprise. Quand une

défaillance est détectée et ce dans un état particulier du système commandé (trace C/G où C/G désigne le procédé G couplé à son contrôleur C), le contrôleur C est figé et le process se trouve alors dirigé par le compensateur. Après réparation de l'entité défaillante, et si l'état du process le permet (il est envisageable de forcer l'état du contrôleur C pour qu'il en soit ainsi), le contrôleur est libéré et le compensateur est mis en veille [NIE, 02].

Les macro-actions reposent sur la formulation d'automates étendus pour lesquels elles sont naturellement considérées comme des événements contrôlables [NOU, 97].

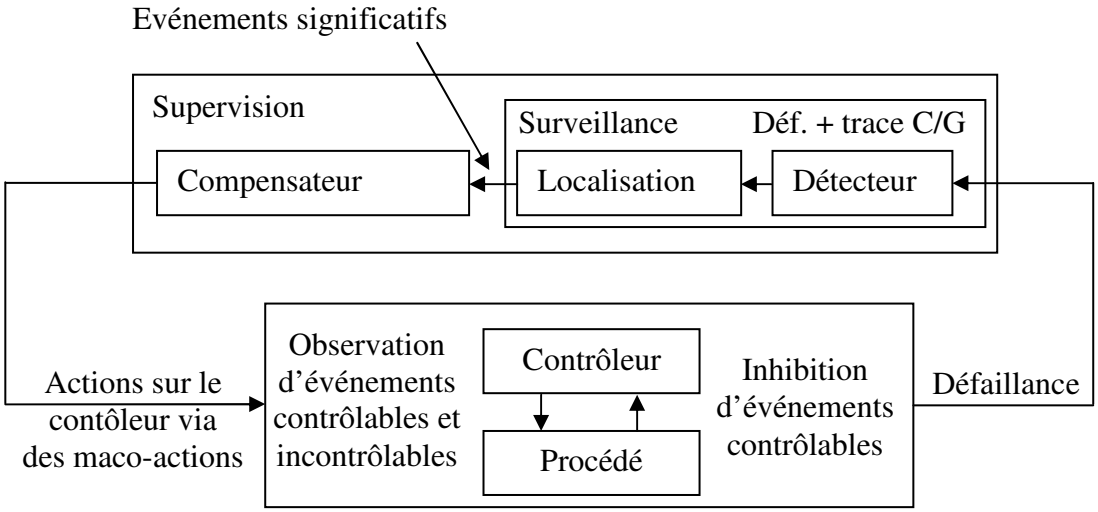


Figure I.9 : Structure de réactivité basée sur le principe de la commande par supervision [NIE, 02]

Localisation

Un axe directeur des travaux de ce laboratoire est l'étude de fonctionnements dégradé pour les systèmes. Ces fonctionnements ne sont pas nominaux et amènent donc à faire des concessions sur les critères initiaux. Cependant, en présence de défaillances, le maintien de la production est jugé préférable. Nous citons ainsi la thèse de Kamach, utilisant une approche multimodèle [KAM, 04].

D'autres approches effectuent l'intégration de contraintes temporelles [KHA, 00]. Remarquons cependant qu'il n'y a pas d'intégration de la stratégie de conduite dans la commande et la surveillance. Au contraire, dans les chapitres qui suivent nous cherchons à exploiter au maximum le fait que le fonctionnement est répétitif [JER, 06f]. Conceptuellement, nous menons une approche analogue aux travaux de Klein à l'Université Kaiserslautern [KLE, 05]. Ainsi, notre fonctionnement répétitif est une forme de modèle de référence. Cependant, nous supposons que le modèle de référence est déjà existant alors qu'une contribution majeure de Klein se situe au niveau de la construction de ce modèle.

I.3.4 Travaux du LAMIH, Valenciennes

Les travaux de l'équipe Génie Industriel et Logiciel (GIL) du Laboratoire d'Automatique et de Mécanique Industrielles et Humaines de Valenciennes (LAMIH), se sont intéressés à l'exploitation et la reconfiguration du SFPM. Ils sont fondés sur une description des modes d'exploitation explicités à partir du Modèle d'Exploitation des Systèmes

Automatisés de Production (MESAP) [PAR, 92]. Ce modèle réside en une décomposition structurelle permettant de mettre en évidence certains niveaux d'abstraction tels que le niveau flux de pièces, le niveau composant et les niveaux application.

M.Dupas [DUP, 99] définit la reconfiguration d'un SFPM comme étant une modification de son comportement dynamique et des modes de marche afin qu'il maintienne les performances souhaitées.

Le processus d'élaboration de la configuration se réalise selon deux niveaux (Figure I.10): un niveau stratégique qui décide la modification en termes de flux de produits et en termes de modes de fonctionnement des ressources, un niveau tactique qui assure les états intermédiaires pour la transition de l'état actuel, et l'état objectif. Ainsi les solutions sont définies en se basant sur des stratégies à court terme, utilisant le mode dégradé ou la réparation de la ressource défaillante, et sur des stratégies à moyen terme par la reconfiguration du système. La décision est fondée sur une évaluation du temps nécessaire à l'élaboration des solutions et sur une estimation du temps de production.

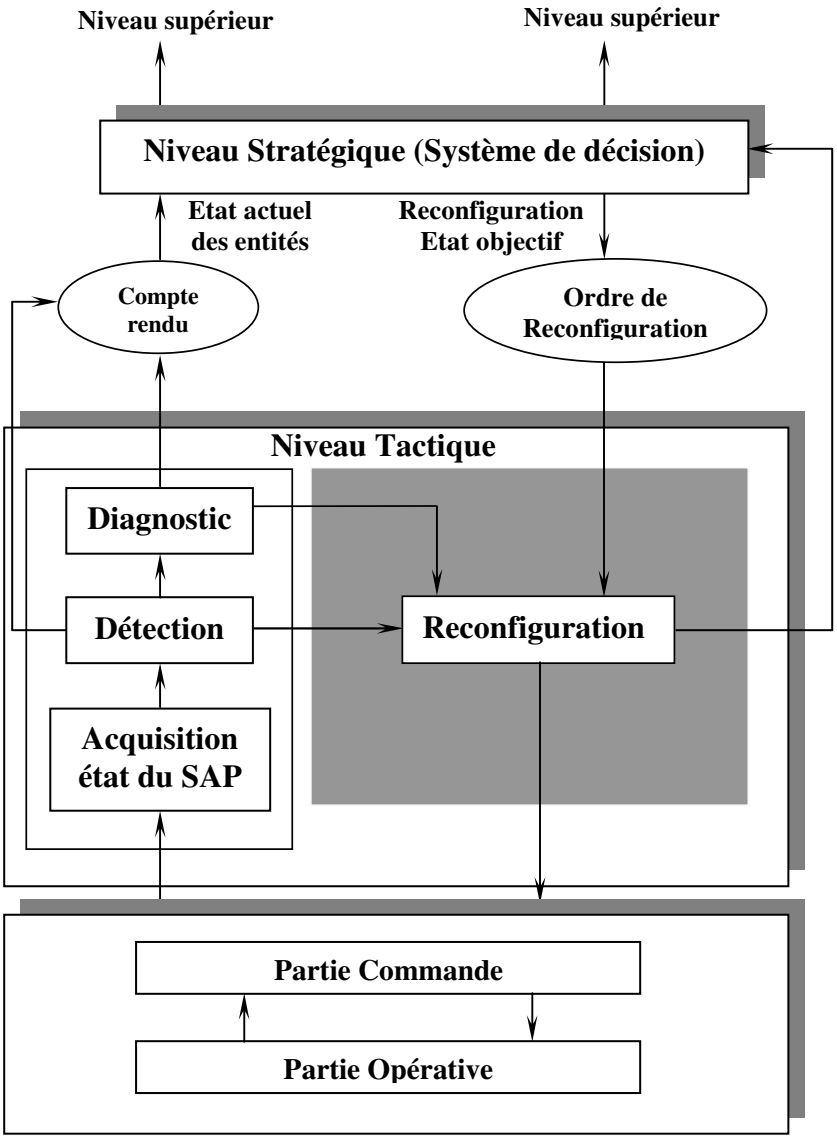


Figure I. 10 : Processus de réalisation de la configuration

Localisation

La décomposition proposée met clairement en évidence l'influence que la loi de commande peut avoir sur les possibilités d'acquisition et donc de détection. Enfin, on ne peut évoquer les travaux du LAMIH sans préciser que nos travaux de thèse ne considèrent pas les interactions entre l'homme et les différents automatismes en présence [GUI, 04], [VAN, 04], [LOS, 07], ni le pronostic [DEB, 07] et les phases de conception et d'exploitation des produits et systèmes de production de biens et de services [EZZ, 08], [BEN, 08].

I.3.5 Travaux de l'université de Carnegie Mellon

Les travaux de L. Holloway et B. Krogh [HOL, 90] [HOL, 91], au LASIP (Laboratory for Automated Systems and Information Processing) de l'université de Carnegie Mellon, placent le modèle du procédé en tant qu'émulateur des évolutions normales de la partie opérative (Figure I.11). Son rôle est en effet de calculer les fenêtres temporelles d'occurrence des comptes rendus émis par le procédé quand celui-ci est soumis à une commande particulière.

Pour une consigne donnée, un bloc de comparaison permet de vérifier si un compte rendu émis par le procédé arrive bien à la date prévue par le modèle. Ce bloc assure également la mise à jour du modèle de comportement (corrections) permettant ainsi de suivre les éventuelles dérives des caractéristiques du procédé (en particulier le vieillissement du matériel).

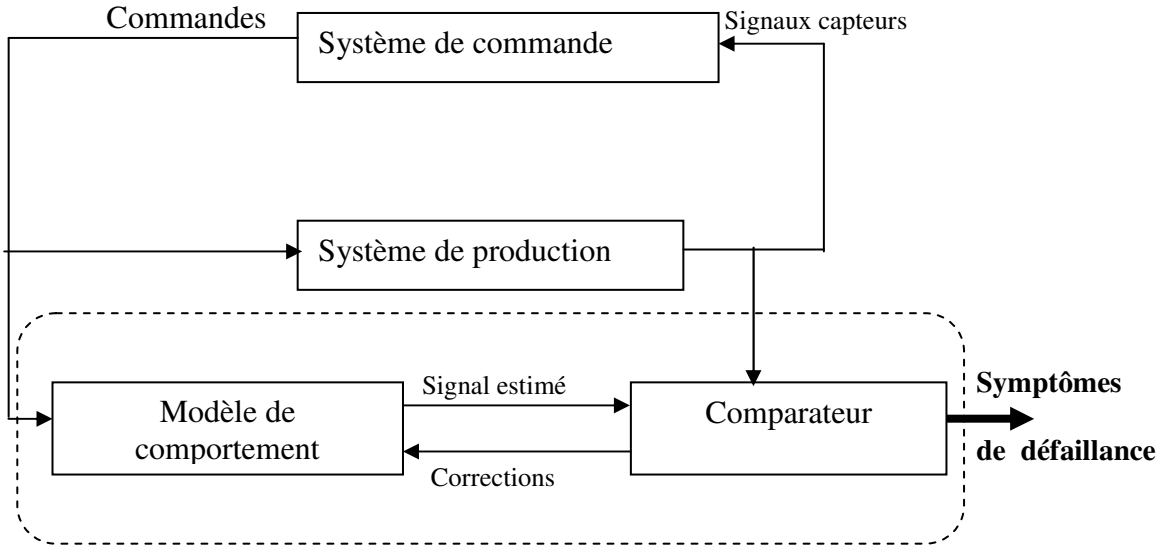


Figure I.11 : Approche comparateur de LASIP

Notons que lorsqu'une défaillance est détectée, le système de comparaison effectue un pré diagnostic en situant précisément le contexte de la détection : compte rendu concerné, commande en cours et type de symptôme. Contrairement aux autres approches, seules les défaillances du procédé sont ici détectées.

De ce fait, si les consignes envoyées au procédé et à l'émulateur ne sont pas cohérentes vis à vis de l'état courant du procédé, rien ne garantit que l'émulateur aura le même comportement que le procédé réel. Si ce n'est pas le cas, une erreur de commande sera

interprétée comme une défaillance du procédé. Le modèle du procédé est alors désynchronisé de la partie opérative. Néanmoins, limitée à des problèmes d'états défendus, l'approche de Krogh a pour objectif la commande et non la surveillance.

I.4 Approche LAGIS

I.4.1 Architecture générale

L'approche du Laboratoire d'Automatique, Génie Informatique et Signal (LAGIS) distingue, Figure I.12, les fonctions commande séquentielle, surveillance, maintenance et supervision pour la mise en œuvre du niveau réactif. La surveillance est un système d'informations, la supervision et la maintenance à la fois des systèmes décisionnels et opérants, et la commande séquentielle un système opérant [TOG, 02].

I.4.2 Planification/Ordonnancement

L'ordonnancement fait partie des problèmes d'optimisation. Il s'agit de chercher à déterminer une solution minimisant (ou maximisant) un critère (ou fonction objectif ou fonction économique) [DUP, 05]. Dans la littérature, il y a plusieurs définitions du problème d'ordonnancement. Nous citons par exemple les deux suivantes :

« Le problème d'ordonnancement consiste à organiser dans le temps, la réalisation d'un ensemble de tâches, compte tenu de contraintes temporelles (délais, contraintes d'enchaînement, etc.) et de contraintes portant sur l'utilisation et la disponibilité des ressources requises par les tâches », [LOP, 01].

« Ordonnancer un ensemble de tâches, c'est programmer leur exécution en allouant les ressources requises et en fixant leurs dates de début », [GOT, 93]. Dans le domaine de l'ordonnancement d'ateliers, la notion structurante de « gamme opératoire » est souvent utilisée comme critère de classification [TRU, 05]. Une gamme opératoire décrit la succession des états d'avancement d'une pièce, ainsi que la succession des lieux opératoires par lesquels elle transite. Elle associe ainsi les moyens physiques (ressources de production) aux fonctions de la gamme logique visant à l'élaboration effective des produits.

J. K. Lee a proposé une nouvelle approche d'ordonnancement cyclique basée sur l'analyse des réseaux de Petri pour obtenir un résultat «satisfaisant» très rapidement à l'opposé des algorithmes classiques qui donnait des résultats très proches de l'optimum mais avec des durées de calcul assez grandes [LEE, 01] [LEE, 04]. La méthode de résolution tire profit de la théorie des réseaux de Petri. En effet, elle est entièrement basée sur la transformation progressive du modèle initial et l'utilisation des matrices associées (matrice d'incidence, matrice d'incidence de place, ...) ainsi que les propriétés des réseaux de Petri (dépliage, vivacité, ...).

Discussion

L'ordonnancement sous contraintes de temps maximum est une thématique de recherche spécifique. Une caractéristique première est que l'existence même d'une solution valide n'est pas prouvée a priori. Les algorithmes de LEE doivent encore faire leur preuve de pertinence sur les problèmes à contraintes de temps.

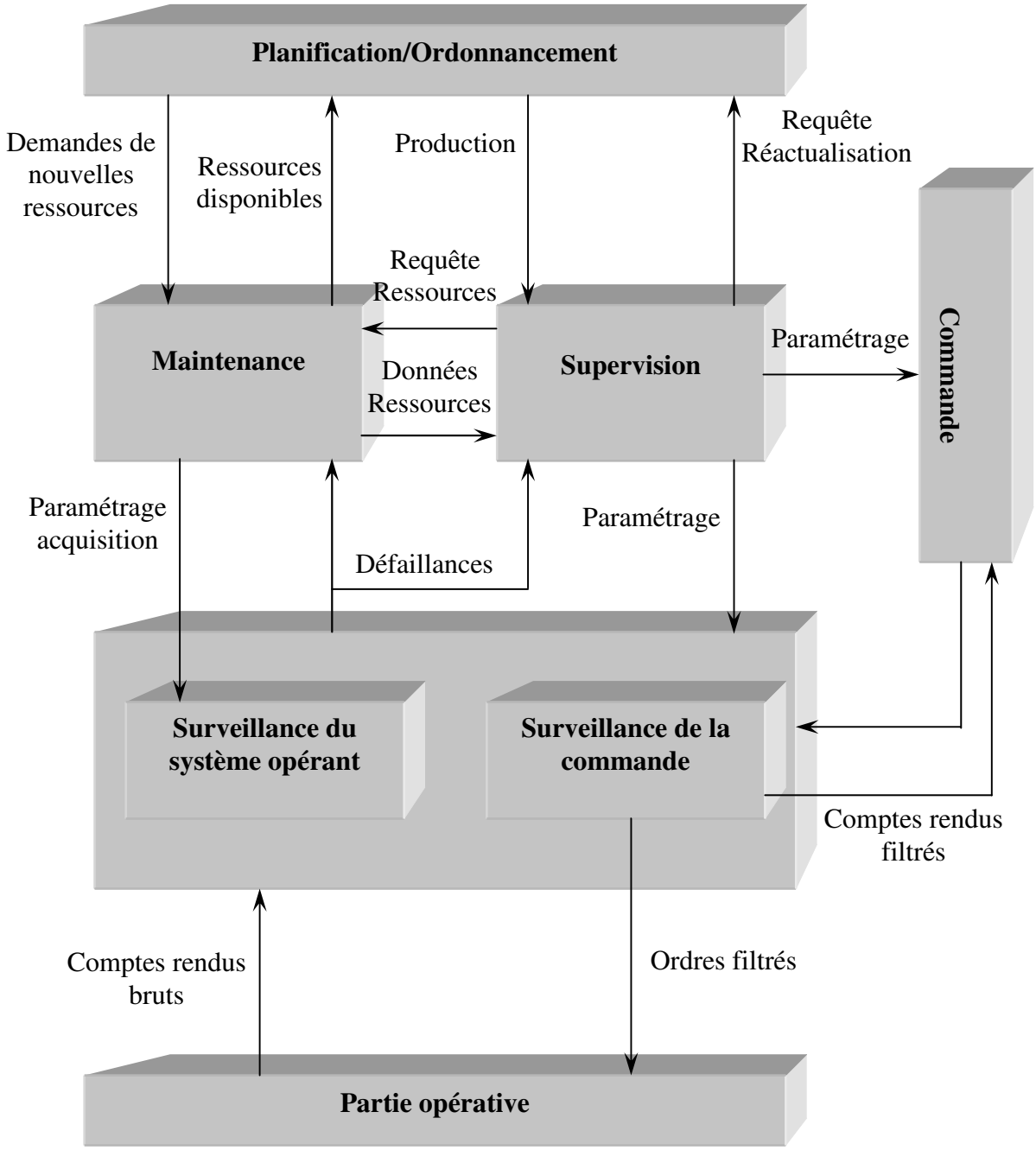


Figure I.12 : Architecture fonctionnelle du système de contrôle/commande d'un SAP [TOG, 02]

Localisation

Dans nos travaux, nous envisageons de nous placer dans le cas d'un ordonnancement cyclique monopériodique déjà élaboré, n'apportant donc pas de nouvelles méthodes d'ordonnancement ni de nouveaux algorithmes d'optimisation. Cependant, l'intérêt de nos résultats, concernant la robustesse vis-à-vis des perturbations temporelles, est qu'ils peuvent fournir un critère d'optimisation pour avoir un ordonnancement permettant une commande temporelle robuste.

I.4.3 Commande séquentielle

Cette fonction a pour objectif de définir les commandes permettant de transformer un produit brut en un produit fini [EUN, 06]. Elle est composée de contrôleurs qui doivent être paramétrées pour réaliser un compromis entre les objectifs de production donnés par l'ordonnancement et l'état des ressources de production. C'est aux fonctions gestion des modes de marches et pilotage qu'il incombe de faire ce paramétrage. La gestion des modes effectue un paramétrage à moyen terme en paramétrant la commande par rapport au mode de marche courant. Le pilotage effectue un paramétrage en temps réel en interprétant les ratios de production par ressource en fonction de l'état du système. Notons que l'ordonnancement en temps réel n'est pas toujours possible.

I.4.4 Surveillance

Le rôle d'un système de surveillance est de connaître à chaque instant l'état du procédé, fournir des données validées au système de conduite, améliorer la disponibilité et la sécurité du procédé. Différentes définitions ont été données concernant la surveillance on peut citer la définition suivante [ZWI, 95]:

Définition I.1

La surveillance représente l'ensemble des moyens mis en œuvre (opérations manuelles ou automatiques, étapes, fonctions et mécanismes) destinées à observer l'état d'une entité (en ligne, en temps réel) dans le but de faire face aux aléas d'un système au cours de la phase d'exploitation.

I.4.4.1 Différents types de surveillance

Nous distinguons, figure I.13, deux types de surveillance : la surveillance du système opérant et la surveillance de la commande. La surveillance du système opérant se décompose elle-même en deux types de surveillance : la surveillance curative et la surveillance prédictive. La surveillance du système opérant a en charge la surveillance des défaillances du procédé qui, dans le cadre de la sûreté de fonctionnement, sont classées en deux catégories : les défaillances cataleptiques et les défaillances progressives :

- Les défaillances cataleptiques : Ce sont des défaillances soudaines et complètes. Il y a passage, sans transitoire, d'un état de fonctionnement normal à un état de panne.

- Les défaillances par dégradation : Ce sont des défaillances partielles et progressives.

Une approche de surveillance indirecte par l'analyse des flux des produits en sortie d'un SFPM a été développée par A. Toguyeni et W. Korbaa [TOG, 01]. Cette approche consiste à surveiller les ressources de production par l'analyse des perturbations qu'elle engendre sur les produits. L'approche de surveillance suppose que toute diminution des performances est due à une augmentation des durées opératoires. Cette augmentation peut résulter soit de défaillances cataleptiques (la durée de l'opération tend alors vers l'infini) soit de défaillances par dégradation. La surveillance comporte deux fonctions : la détection et le diagnostic.

Pour détecter les perturbations du flux de production engendrées par les défaillances, il suffit à une date donnée, de comparer le flux mesuré, à la référence maximale fixée comme objectif de conduite. Toute baisse du flux est alors révélatrice de l'occurrence d'une défaillance dans le système [KOR, 03]. En effet, une baisse de flux s'explique par une diminution des performances d'une ressource. D'un point de vue pratique, une baisse de performance d'une ressource de production est assimilable à une augmentation de ses durées opératoires.

La phase de détection est suivie du diagnostic. L'objectif principal du diagnostic est de déterminer l'opération dont la défaillance est la conséquence des retards des pièces observés en sortie du système. Le diagnostic est lancé par la première détection de retard de pièce au cours du cycle de production courant. Le retard ainsi détecté est un événement est qualifié de symptôme initiateur [KOR, 03]. A partir du symptôme initiateur, le principe du diagnostic consiste à générer des hypothèses qui seront ensuite confirmées (resp. réfutées) par l'observation (resp. la non observation) de retards d'autres pièces en sortie, au cours du cycle courant (cycle de détection du premier symptôme) ou du cycle suivant (dans le contexte d'un ordonnancement 1-cyclique par rapport aux pièces et aux machines).

Discussion

La surveillance indirecte est très peu appliquée dans les systèmes à contraintes de temps. En effet les ateliers étudiés sont instrumentés puisque on a une obligation de garantir le respect des contraintes de temps de séjour.

Lorsque les instants de sortie dérivent, la production n'est probablement plus conforme... ce qui se traduit par l'arrêt de la chaîne de production (sauf quand on a des preuves de robustesse). Du coup la surveillance indirecte de l'outil de production est difficilement applicable.

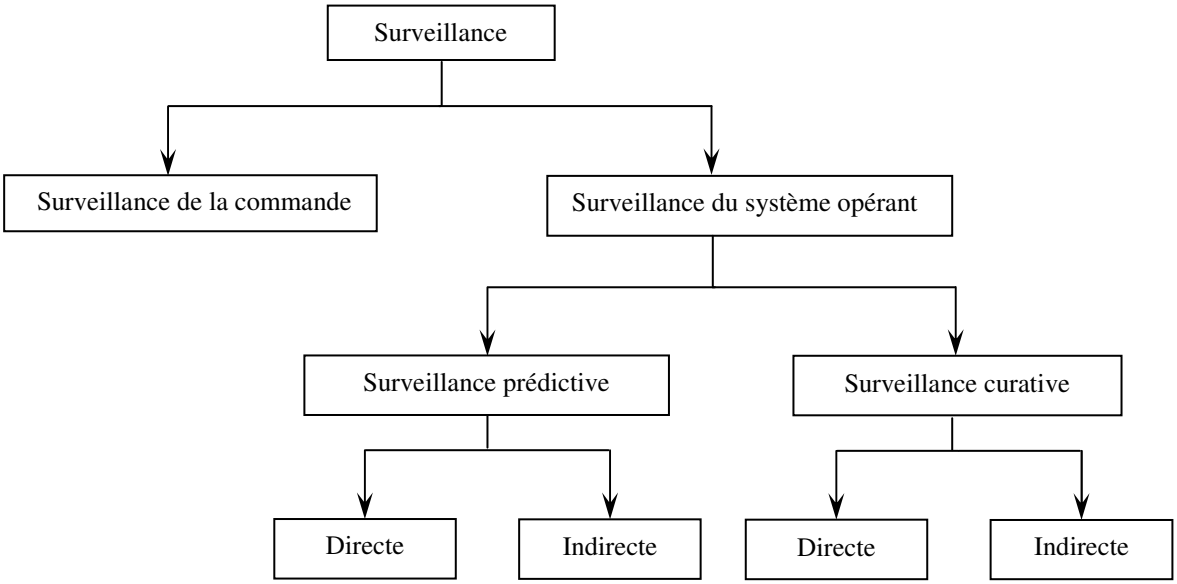


Figure I.13 : Les différents types de surveillance

I.4.4.2 Les fonctions de la surveillance

Les performances d'un système de surveillance peuvent être améliorées grâce aux actions sur les différentes fonctions du système de surveillance à savoir les fonctions de suivi, détection, diagnostic et la fonction reprise.

- **Suivi [DHO, 05]**

La fonction de suivi est de garder une trace des événements observés et des traitements effectués. Ces informations peuvent être utilisées par la fonction commande et les autres fonctions faisant partie de la surveillance-supervision. Quelle que soit la stratégie appliquée, le suivi d'évolution des variables réelles en fonction du temps doit assurer le bon fonctionnement du système. Ses objectifs sont : la réduction des temps d'immobilisation et la conformité du produit fabriqué.

- **Détection [RAY, 04]**

La détection consiste à comparer la signature courante à la signature de référence associée aux modes de fonctionnement identifiés et ensuite à prendre une décision en fonction du résultat de la comparaison.

Dans les procédures de détection, les signatures utilisées sont des grandeurs scalaires, des courbes ou des images. Sachant que le signal d'écart possède un comportement aléatoire, la prise de décision nécessite la définition de seuils aux maxima et aux minima au-delà desquels on déclarera un dysfonctionnement. Les signatures étant toujours bruitées, il devient nécessaire de faire appels aux tests statistiques de décision pour évaluer la prise de risque. En effet, si les valeurs des seuils sont trop basses on observera souvent des fausses alarmes. Par contre si les seuils sont élevés, on évite des fausses alarmes, mais les risques de non-détection d'un dysfonctionnement sont importants.

Cette fonction permet alors de caractériser le fonctionnement du système de normal ou d'anormal. On peut distinguer deux grandes classes d'anomalies:

- la première regroupe les situations pour lesquelles le comportement du système devient anormal par rapport à ses caractéristiques intrinsèques,

- la seconde regroupe les situations dans lesquelles le comportement est anormal par rapport à la loi de commande appliquée.

- **Diagnostic [RAY, 04]**

Les procédures de localisation et d'identification correspondent au diagnostic. Elles nécessitent une connaissance des pannes pouvant apparaître sur le procédé : le type de pannes et leurs symptômes.

La localisation consiste à déterminer l'endroit du procédé où s'est produite la défaillance et la nature de la défaillance.

L'identification consiste à identifier les causes précises d'une anomalie grâce à des signatures répertoriées par les experts, et validées après expertise et réparation des dysfonctionnements. Les informations ainsi obtenues sont fournies au service de maintenance.

Le Diagnostic consiste à localiser les éléments défaillants et à identifier les causes à l'origine du problème; ceci en établissant un lien causal entre les symptômes et les éléments fautifs à remplacer. La phase qui suit correspond à la décision. Elle a pour rôle de déterminer et d'engager les actions permettant de ramener au mieux le système dans un état normal. Ces actions peuvent être des ordres d'arrêt d'urgence ou des lancements de réparations ou d'opérations préventives. Dans le cas où on voudrait éviter une perte de production, cette décision peut être une reconfiguration du fonctionnement du procédé.

- **Reprise [DHO, 05]**

Lorsque le diagnostic est établi, il faut déterminer un ensemble de décisions qui ramènent l'installation dans un état de fonctionnement acceptable.

La reprise est un ensemble de procédures intégrées au système de commande, fondé sur le choix des actions permettant de revenir dans le domaine de satisfaction des contraintes du modèle de bon fonctionnement.

Localisation

Dans le quatrième chapitre, nous abordons le problème da la surveillance d'un atelier de production laitiére. Nos travaux contribuent à la fonction surveillance par des résultats concernant la détection et la localisation des défaillances. Nous traitons le cas de la surveillance prédictive indirecte du système opérant en utilisant les chroniques. La localisation de l'outil ou du matériel défaillant est élaboré à laide des arbres de défaillance.

I.4.5 La maintenance

I.4.5.1 Définitions

Définition I.2

La maintenance est l'ensemble de toutes les actions, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise [AFN, 02]. C'est la définition proposée par le dictionnaire Larousse qui, à notre avis, décrit de façon plus générique le terme maintenance, en incluant dans cette notion non seulement « l'ensemble des actions », mais « l'ensemble de tout » ce qui permet au système de remplir sa mission dans les conditions de fonctionnement requises par le constructeur. Étant l'objet principal de tous les travaux liés à la maintenance, le terme bien mérite également sa définition

Définition I.3

Un bien est tout élément, composant, mécanisme, sous-système, unité fonctionnelle, équipement ou système qui peut être considéré individuellement [AFN, 02].

Définition I.4

Une dégradation est une évolution irréversible d'une ou plusieurs caractéristiques d'un bien liée au temps, à la durée d'utilisation ou à une autre cause externe [AFN, 02].

Définition I.5

Une défaillance est la cessation de l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise [AFN, 02]. Si une défaillance, sur un plan temporel, correspond à une date t, la panne représente un état du système après une défaillance.

I.4.5.2 Stratégies de maintenance

Une stratégie de maintenance traduit la manière dont la défaillance est considérée. Le traitement de la défaillance peut être fait de deux manières : intervention avant la défaillance, il s'agit alors de maintenance préventive ou après la défaillance et il s'agit de maintenance corrective. Ces deux formes de maintenance (préventive et corrective) correspondent aux deux mots-clés (maintenir et rétablir) de la définition AFNOR NF EN 13306 que l'on peut décomposer et représenter comme sur la figure I.14 [JER, 06f].

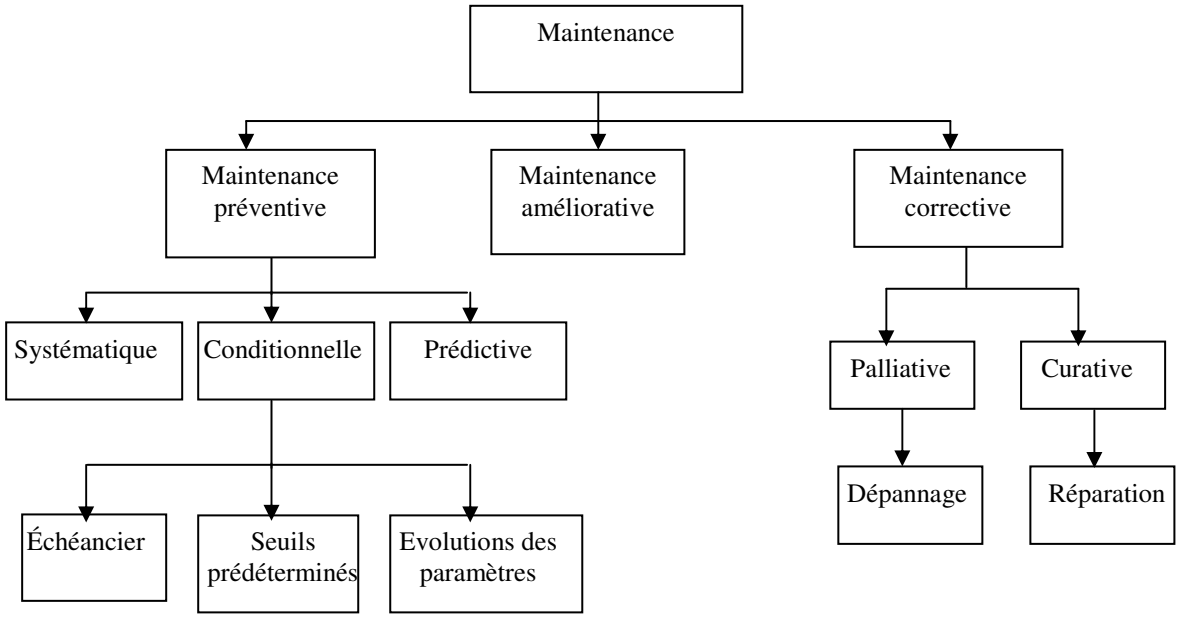


Figure I.14 : Différentes stratégies de maintenance

La maintenance corrective est la forme de maintenance la plus "traditionnelle" car elle n'intervient qu'après l'apparition de la défaillance [AFN, 02]. Cette maintenance peut se traduire par deux types d'intervention. Le premier type est provisoire, avec des interventions palliatives (simples dépannages). Le second type a un caractère définitif, avec des interventions curatives (réparations ayant pour but de supprimer durablement les défaillances). La maintenance corrective est dépendante du caractère aléatoire des défaillances ; elle n'est donc pas programmable et nécessite la disponibilité des ressources humaines et matérielles adéquates.

- La maintenance préventive constitue une évolution des services de maintenance traditionnelle. Elle a pour but de diminuer les pertes dues aux défaillances, en les prévenant avant qu'elles ne surviennent. Il existe plusieurs types de maintenance préventive :

    - la maintenance préventive systématique, organisée selon un échéancier, planifiée dans le temps, elle est simple à mettre en place mais peut être coûteuse car les interventions ne sont pas toujours justifiées,

    - la maintenance préventive conditionnelle, réagissant au franchissement d'un seuil détecté par un capteur, provoquant une intervention ; elle peut s'appliquer à tout système équipé d'un capteur détectant une anomalie ou une dérive.

- La maintenance prédictive (ou prévisionnelle), basée sur le suivi du matériel et sur des analyses périodiques, pour déterminer la tendance de la dégradation et estimer la période d'intervention. Elle permet de maximiser l'intervalle entre deux réparations.

- La maintenance améliorative vise à augmenter la fiabilité, la maintenabilité, la disponibilité et la sécurité d'un équipement ou d'un sous-ensemble. Ce type de maintenance fait partie des interventions de grande maintenance, avec les travaux de rénovation et de remise à neuf [AFN, 02].

I.4.5.3 Processus de maintenance

Une activité de maintenance est formée de plusieurs étapes, généralement successives, distinguées par les besoins nécessaires, les mécanismes engagés et les résultats produits. Cette décomposition a été abordée dans plusieurs travaux [PER, 06], [CHE, 06]. Les travaux de Pérès, par exemple, différencient six étapes qui seront encore distinguées selon la nature préventive ou curative de l'intervention (figure I.15).

L'étape "détection" correspond au début de l'intervention (alerte), déclenchée par la détection d'un évènement : défaillance en cas d'intervention corrective ou donnée calendaire en cas d'intervention préventive.

Les étapes "préparation" et "diagnostic" correspondent respectivement à la préparation de l'intervention (acheminement,…) et aux investigations qui conduisent à la caractérisation de l'évènement (nature de la défaillance et causes possibles en action curative,…). L'étape "logistique" rassemble l'ensemble des actions nécessaires au regroupement des diverses ressources nécessaires à l'intervention incluant la commande des pièces de rechange selon les besoins, leur acheminement, les outillages nécessaires, l'attente de disponibilité des acteurs.

L'étape "action" concerne l'intervention de maintien ou la réparation proprement dite. L'étape "contrôle" concerne les tests de conformité de l'intervention et de vérification du fonctionnement de l'équipement, la remise en fonctionnement de l'équipement lorsque l'intervention est validée ; elle est souvent suivie du classement de l'intervention réalisée parmi les expériences réutilisables.

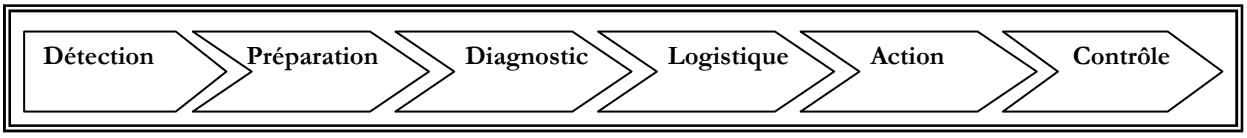


Figure I.15 Processus d'intervention de maintenance

Localisation

D'un point de vue conceptuel, la recherche de robustesse peut entraver la mise en œuvre de la maintenance préventive en masquant les résidus des perturbations. Or ces perturbations sont peut être les signes annonciateurs d'une panne. Il est donc important d'intégrer la robustesse dans la politique de maintenance.

I.4.6 Supervision

La supervision assure un compromis entre les besoins en production définis par la planification/ordonnancement ou l'opérateur de conduite et les contraintes de productions issues du procédé. C'est donc une fonction qui est au carrefour d'une multitude de flux d'informations qui doit être intégrée pour réaliser une synthèse [TOG, 02]. Elle se décompose, figure I.16, en plusieurs fonctions : la gestion des modes, le recouvrement et l'ordonnancement temps réel

I.4.6.1 Ordonnancement temps réel

Le module d'ordonnancement temps réel est chargé d'appliquer les décisions concernant la commande (principalement le routage des pièces) en levant les derniers indéterminismes de la commande [BER, 00].

I.4.6.2 Gestion des modes

Le module de gestion des modes est chargé d'appliquer les décisions concernant les ressources. Il amène les ressources du système d'une configuration à une autre [BER, 00]. Il existe de nombreux modes associés à un SFPM. Cinq familles de modes sont identifiées : les modes de marche (automatique, semi-automatique, cycle par cycle, manuel, neutre), les modes d'arrêt (hors tension, initialisation, fin de cycle, état déterminé, neutre), les modes de fonctionnement (normal, dégradé, hors-service), les modes opératoires (repos, production, test, maintenance) et les modes de production (arrêt, démarrage, en production, clôture).

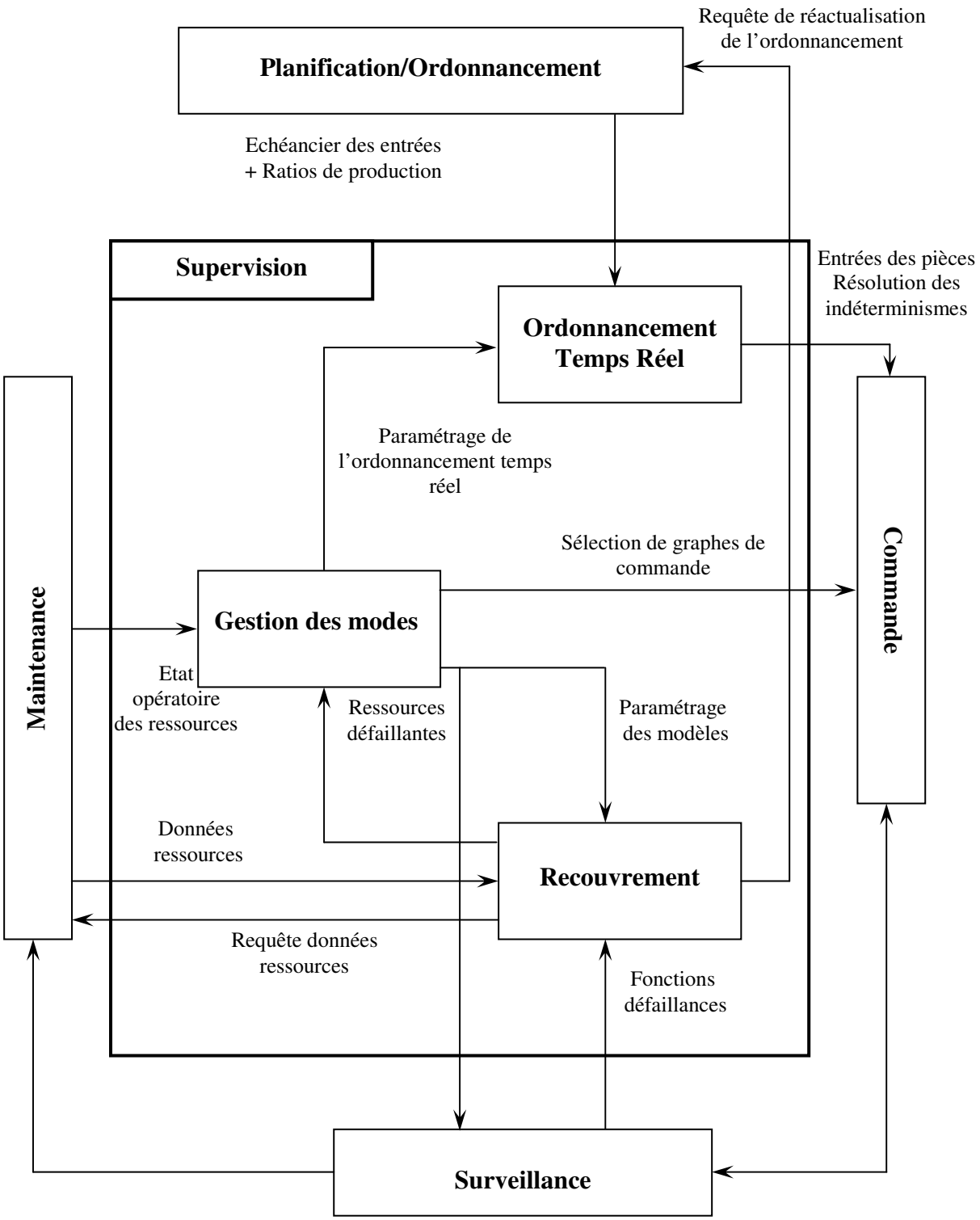


Figure I.16 : Architecture fonctionnelle et flux interne de la supervision [TOG, 02]

I.4.6.3 Recouvrement

Le module de recouvrement décide de la nouvelle configuration du SFPM [BER, 00]. Il détermine en particulier les ressources à mettre en fonctionnement, celles à arrêter, et les séquences d'opérations qui doivent être appliquées de façon à réaliser une production donnée.

En cas de dysfonctionnement, le recouvrement doit déterminer en temps réel les actions correctives à appliquer pour arrêter le système ou lui permettre de poursuivre la production dans une configuration pouvant être dégradée. Le schéma de réaction face à une défaillance est donné par la figure I.17.

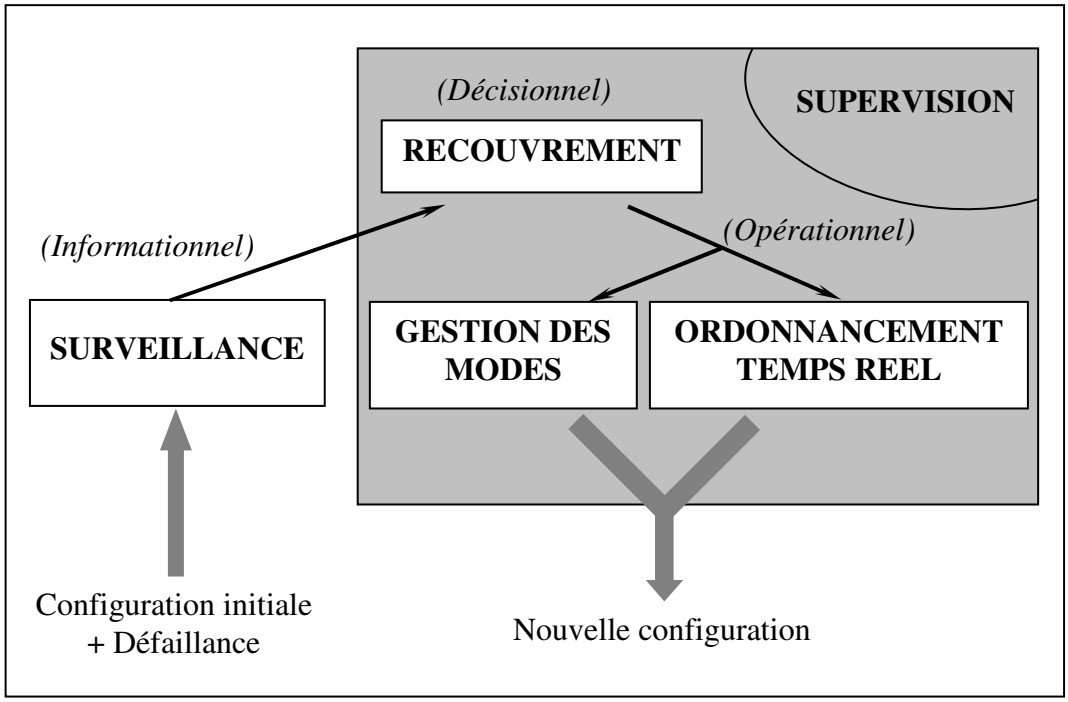


Figure I.17 : Schéma de réaction face à une défaillance [BER, 00]

Localisation

Notre apport à la fonction de supervision se situe dans le module de recouvrement. Dans le troisième chapitre, nous abordons le problème de la commande robuste vis-à-vis des perturbations temporelles. Cette partie du travail se situe dans le module ordonnancement temps réel. La répartition des ressources a été effectuée par la couche d'ordonnancement et ne change pas. Seuls les instants de début des opérations sont modifiés. Une partie restreinte de l'ordonnancement temps réel est alors considérée.

Concernant le module de recouvrement, notre contribution majeure est la donnée d'une stratégie de filtrage floue des comptes rendus issus du module de surveillance.

I.4.7 Conclusion

Dans cette section, nous avons rapidement dépeint les interactions que notre travail peut avoir avec les différents modules d'une décomposition fonctionnelle de la conduite d'ateliers manufacturiers. Après cette description générale, nous allons mettre l'accent sur certains points d'intérêts.

I.5 Les systèmes manufacturiers

Les ateliers, où le facteur temps est un paramètre critique, sont communément désignés: ateliers à contraintes de temps. Ce type d'ateliers fait appel à des procédés dont les temps

opératoires doivent être compris entre des minima et des maxima. Les durées des opérations sont alors spécifiées par des intervalles de temps. Le respect de ces contraintes est imposé par une gamme opératoire spécifique à chaque produit.

Ce mémoire s'intéresse aux ateliers manufacturiers à contraintes de temps de séjour, où, à chaque opération est associé un intervalle de temps dont la borne inférieure désigne le temps minimum nécessaire à l'exécution de l'opération. Si le temps accordé à cette opération est inférieur à cette borne, cela signifie que l'opération n'a pas été achevée. La borne supérieure fixe le temps maximum à ne pas dépasser pour ne pas altérer la qualité des produits fabriqués.

L'industrie manufacturière fait régulièrement appel à ce type de procédés. C'est le cas par exemple de l'industrie utilisant des réactions chimiques pour établir le traitement d'une pièce. Le décapage d'une pièce par une immersion dans un bain d'acide nécessite un temps de trempe minimum et maximum, et que, par conséquent, la violation de ces spécifications peut avoir des conséquences graves sur la qualité de la production.

Dans l'industrie agroalimentaire et plus particulièrement dans une chaîne de froid, le fait de sortir un aliment du réfrigérateur oblige à respecter le temps minimum, qui est le temps nécessaire du traitement, et le temps maximum afin de ne pas dégrader la qualité du produit.

Les travaux proposés s'intéressent à la production manufacturière en très grandes séries où l'existence de pannes et de dérives doit être intégrée dans une évaluation globale de l'organisation de l'atelier [TOG, 96]. Nous supposons que les ressources ont été affectées et que l'ordre des opérations est déjà fixé par la couche d'ordonnancement. Les hypothèses de fonctionnement répétitif et d'absence de postes d'assemblage sont adoptées.

I.5.1 Commande des systèmes à contraintes de temps

La possibilité de commander les systèmes à évènements discrets, de manière à leur faire respecter un comportement spécifique, est une problématique fréquemment rencontrée dans la littérature sous une formulation assez générale [HOL, 90], [BOI, 93], [BON, 05]. Le travail présenté dans ce mémoire s'attache à développer des outils théoriques pour aborder la commandabilité sous contraintes de temps de séjours. Les Réseaux de Petri (RdP) P-temporels sont utilisés comme outils de modélisation [KHA, 96]. On enrichit le modèle par une couche de commande, comme cela est présenté dans les travaux de Krogh ou Long, pour intégrer le fait que toutes les transitions ne sont pas commandables [LON, 93], [HOL, 91]. L'étude sera restreinte à deux topologies d'atelier en fonctionnement répétitif.

Bilan des Travaux sur les systèmes à Contraintes de Temps

- **Travaux de JERBI [JER, 06f]**

Les travaux de Jerbi s'intéressent entre autres à la synthèse de commande permettant de faire face aux perturbations d'une nature quelconque ayant des conséquences temporelles. Rappelons que d'un point de vue fonctionnel, l'ordonnancement de l'atelier est supposé fixé et que cette commande n'agit que sur les instants de tirs des transitions, mais en aucun cas, la permutation dans une séquence de tir préétablie n'est envisageable. La définition informelle de la commande que nous venons de donner correspond à celle de la commande temporelle.

Concrètement, il s'agit d'introduire un mécanisme permettant de retarder ou d'avancer les instants de tir d'un graphe d'événement P-temporel. De la même façon, il faut modéliser le fait que certaines parties du processus de fabrication sont instrumentées et d'autres ne le sont pas. En l'absence de capteurs, le début ou la fin de certaines opérations ne sont pas directement observables. Une proposition classique dans ce cas de figure est d'introduire une distinction entre les transitions : certaines sont observables et d'autres non, certaines sont commandables et d'autres non. Cela ramène alors à traiter un cas particulier de la problématique décrite par Krogh et Holloway. Ces travaux traitent la synthèse de commande dans le but d'éviter des états qualifiés d' « états interdits ». Le travail de Jerbi se cantonne lui, à éviter des états temporels correspondant aux dépassements des temps de séjour valides. Ces états interdits qui nous intéressent ici, correspondent d'ailleurs à des morts de marques.

– **Travaux de ALAOUI**

Les travaux de Alaoui [ALA, 05] s'intéressent aux problèmes de vivacité, d'estimation et de commande de réseaux de Petri du type Graphes d'Evénements (GE) temporisés et temporels, au moyen d'outils algébriques comme l'algèbre des dioïdes. La modélisation mathématique de ces systèmes dynamiques à événements discrets conduit à des systèmes d'équations et d'inéquations utilisant les opérations de minimum, de maximum et d'addition. Le problème de l'estimation d'état dans les GE temporisés et à flux temporels est étudié. L'estimateur proposé permet en même temps le développement d'une nouvelle approche pour la détection de défaillances.

Dans sa thèse, Alaoui s'intéresse à la commande optimale des GE à flux temporels. La détermination de la commande est faite en appliquant une méthode du type point fixe comme pour l'estimation. La particularisation de celle-ci au cas des GE temporisés, permet de retrouver les équations classiques. Ces travaux ont fait l'objet de plusieurs publications [DEC, 10]. Ils ont le mérite de souligner les particularités mathématiques fondamentales des problématiques de temps de séjours.

– **Travaux de AMARI**

Les travaux de Amari [AMR, 08] s'intéressent au problème de commande des système de production soumis à une contrainte temporelle stricte. Une approche de commande basée sur l'algèbre Min-Plus est développée. Une application de cette approche à un exemple réel de processus de production sous contrainte de temps, est réalisée. Ce processus fait partie d'une ligne de fabrication de tube de caoutchouc pour équipement automobile. Le principe de cette approche est de calculer une loi de commande, basée sur un retour d'état causal, pour garantir le respect de la contrainte temporelle.

I.5.2 Surveillance des systèmes à contraintes de temps

Les ateliers où le facteur temps est un paramètre critique sont communément désignés ateliers à contraintes de temps. Les industries qui les utilisent sont généralement sans compromis vis-à-vis du respect de ces contraintes, car la sécurité des êtres humains en dépend. Un certain nombre de travaux fournit des approches spécifiques efficaces pour la modélisation [KHA, 96], l'ordonnancement [2], la commande [JER, 09a], l'observabilité [DEC, 10], l'évaluation de performance [KHA, 96], [DEN, 05] et la robustesse [COL, 08]. Cependant, cette littérature dédiée aux contraintes de temps est assez démunie en ce qui concerne la surveillance et le diagnostic.

La surveillance des processus industriels permet d'accroître la productivité et de diminuer le coût d'entretien par l'amélioration de la disponibilité des systèmes de production [KOM, 04]. Ces processus sont susceptibles d'évoluer sous deux types de modes de fonctionnement : des modes normaux et des modes anormaux.

Dans le cadre de notre étude, nous souhaitons orienter nos travaux plus particulièrement vers les systèmes manufacturiers qui représentent une catégorie importante des SED et qui interviennent sur les procédés de production, de traitement et de transformation de produits.

Problématique de surveillance des systèmes à Contraintes de Temps

Les systèmes manufacturiers sont constitués de différents éléments technologiques devant réagir entre eux et constituant ce qu'on appelle la partie opérative. On parle alors de systèmes informationnellement décentralisés sur chaque élément. La problématique de surveillance des SED est essentiellement liée au fait que les modèles représentant les SED ne sont pas riches en terme d'informations. Par conséquent, il faut exploiter toute l'information disponible sur le procédé. Il s'agit de prendre en compte à la fois :

- Du comportement événementiel de la partie opérative à travers toutes ses situations possibles. Son modèle suppose une connaissance précise de la technologie du matériel du point de vue de son architecture (composants, agencement, articulations, mécanismes de synchronisation et d'exécution). Il fait très souvent appel à l'expert à travers un modèle intuitif du système.

- De l'information temporelle qui représente la réactivité des actionneurs à un ordre envoyé par la partie commande. Elle peut être représentée par des contraintes temporelles, comme par exemple les chroniques ou les templates. Ces contraintes informent sur le temps de réponse à un ordre (temps de sortie d'un vérin, transfert d'un chariot, …) et donc fournissent des données importantes pour le diagnostic qui ne sont pas toujours fournies par la commande.

- De la dynamique d'un atelier de production qui est liée d'une part, à l'évolution du flux des produits finies ou semi-finies et d'autre part à la vitesse du processus de production. Une défaillance peut donc entraîner soit une variation de ce flux au niveau de chaque machine soit un retard de production.

Face à ces contraintes et lors de l'occurrence d'un dysfonctionnement dans un atelier manufacturier de production, il est crucial de réagir au plus tôt pour maintenir la productivité et assurer la sécurité du système. Il est reconnu depuis quelques années que la surveillance distribuée a un apport significatif face à ce type de problème. La plupart des travaux développés récemment ont adopté une architecture distribuée pour la surveillance. La surveillance distribuée est une solution aux nombreux problèmes posés par les architectures classiques (centralisée, hiérarchique, …), d'un point de vue complexité, tolérance aux fautes, réduction des coûts, etc. L'adoption d'une structure distribuée pour la surveillance d'un atelier manufacturier a engendré la distribution des différentes fonctions participant à la réalisation de la tâche de surveillance.

La conception d'un modèle de surveillance constitue la principale contribution du chapitre IV. Nous présentons en détail une démarche à suivre pour la mise en œuvre d'un

modèle de surveillance constitué essentiellement d'un module de diagnostic et d'un module de détection

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les structures, les propriétés et les objectifs des systèmes automatisés de production.

Dans une deuxième partie, l'utilisation de quelques références de l'état de l'art nous a permis de préciser que nos travaux n'intègrent ni de notion de modularité hiérarchique ni les aspects humains dans les ateliers manufacturiers. Les travaux du LAI, nous ont permis de situer nos travaux dans une architecture orientée commande. Il est à noter qu'une étude du fonctionnement dégradé est utilisée dans notre démarche.

Dans la dernière partie de ce chapitre, nous avons situé notre contribution en la positionnant dans une architecture fonctionnelle de la conduite telle qu'elle est utilisée au LAGIS. Notre étude concernant la robustesse couvre une partie restreinte de l'ordonnancement temps réel faisant partie intégrante du module de supervision. Par contre, la spécification d'une commande robuste peut être utilisée comme fonction de coût ou comme critère d'admissibilité dans la phase d'ordonnancement dans le but d'atténuer l'explosion combinatoire.

Le problème de la modélisation des incertitudes inhérentes aux procédés, aux opérateurs et à la variation de qualité des produits est abordé dans le quatrième chapitre. L'utilisation des fonctions de possibilité dans le cadre de la mise en œuvre de la logique flou sera ainsi mise en avant.

Dans le chapitre qui suit, nous allons présenter certains modèles de RdP de la littérature utilisés pour la modélisation des procédés à contraintes de temps. Leurs contributions pour l'étude des systèmes à contrainte de temps seront bien sûre mises en avant.

CHAPITRE II :

Outils de Modélisation des Systèmes à Evénements Discrets Intégrant le Temps

Chapitre II

Outils de Modélisation des Systèmes à Evénements Discrets Intégrant le Temps

II.1 Introduction

Lors de l'étude des Systèmes à Evénements Discrets (SED) plusieurs modèles se présentent, parmi lesquels nous citons : les automates à état fini et les Réseaux de Petri (RdP). Les automates à états finis ont pour avantage une littérature importante concernant la synthèse de commande. Néanmoins, l'étude des systèmes à contraintes de temps de séjour contient une problématique singulière qui survient lorsqu'on est en présence d'un mécanisme de synchronisation. Il se trouve que les automates, par définition, ne représentent pas de manière explicite les structures de synchronisation. Les RdP sont reconnus comme étant un outil puissant de modélisation des parallélismes, des conflits et des partages de ressources, en présence de synchronisations.

Depuis la création des RdP autonomes des nombreuses extensions ont été apportées. Dans la littérature, ces derniers sont souvent classés en deux grandes familles : les RdP temporisés et les RdP temporels. Ces réseaux modélisent les systèmes manufacturiers à contraintes de temps qui constituent le cadre de notre travail. La principale caractéristique de ces systèmes réside dans le fait que les durées, associées aux différentes opérations à effectuer, sont spécifiées par un intervalle de temps et non plus par une valeur ponctuelle. La validité des résultats à obtenir ne dépend pas uniquement de l'ordre dans lequel ces derniers seront obtenus, mais aussi du temps qui sera pris pour les obtenir. Les variations (dérives) constatées sur certaines durées opératoires ne se contentent pas seulement d'affecter les performances du procédé modélisé, mais elles peuvent dans certains cas, directement porter atteinte à la qualité du produit fini.

La première section de ce chapitre est consacrée au rappel des propriétés fondamentales des RdP autonomes tirées de la littérature scientifique. Ces rappels permettent de nourrir la discussion sur la modélisation des contraintes de temps de séjour de la section suivante. L'accent est mis sur les propriétés comportementales des RdP autonomes.

Chronologiquement, les temporisations ont été tout d'abord associées aux transitions (les RdP t-temporisés [RAM, 74]), puis aux places (les RdP p-temporisés [SIF, 77] et les RdP P-temporels [KHA, 97]) puis aux places et transitions (les RdP p-t-temporisés). La deuxième section de ce chapitre présente sommairement les RdP t-temporels, ensuite les RdP P-temporels et enfin les RdP P-temporels commandés, orientés vers la commande.

La troisième partie de ce chapitre s'intéresse aux applications des RdP P-temporels sur les ateliers à contraintes de temps de séjour. Les circonstances ont dirigé ces travaux vers des ateliers en fonctionnement répétitif. Deux modèles d'ateliers sont présentés :

- Atelier multi-produits (Modèle d'Hillion) : après la description de la structure de l'atelier étudié ainsi que toutes ses contraintes de production, un modèle, utilisant le

formalisme des RdP P-temporels, est détaillé et analysé tout en s'appuyant sur les approches de l'état de l'art [HIL, 89], [LON, 93b], [JER, 09a],

- Atelier de production laitière : c'est un atelier industriel à fonctionnement cyclique monopériodique avec postes d'assemblage. Pour prendre en compte des opérations d'assemblage, les structures de graphes d'événements valués sont utilisées. Une transformation d'un graphe d'événement valué en un graphe d'événement, basée sur un algorithme proposé dans [NAK, 99], est appliquée à un atelier de production laitière. Cette opération permet ensuite d'utiliser les résultats classiques concernant les systèmes de production à contraintes de temps.

II.2 Outils de modélisation orientés commande

II.2.1 RdP autonomes

Les RdP ont été introduits par Carl Adam Petri dans sa thèse intitulée «Communication avec Automates» en 1962.

Définition II.1

Un RdP R est un graphe biparti décrivant les relations entre des conditions et des événements [DAV, 92]. Il est composé par un ensemble de places représentées par des cercles, un ensemble de transitions représentées par des barres et deux applications ayant comme ensemble d'arrivée l'ensemble des entiers naturels.

R= <P, T, Pre, Post> où :

- $P = (p_1, p_2, ..., p_m)$ est un ensemble fini de places,
- $T = (t_1, t_2,..., t_n)$ est un ensemble fini de transitions,
- Pre : P x T $\rightarrow$ IN est l'application places précédentes,
- Post : P x T $\rightarrow$ IN est l'application places suivantes.

Notations

- t° (resp. °t) l'ensemble des places de sortie (resp. d'entrée) de la transition t,
- p°(resp.°p) désignera l'ensemble des transitions de sortie (resp. d'entrée) de la place p,
- m = card (P): le nombre de places du RdP,
- n = card (T) : le nombre de transitions du RdP.

Définition II.2

Un RdP est pur si et seulement si :

$$\forall p \in P \text{ et } \forall t \in T : \ Pre(p,t) \times Post(p,t) = 0$$

Le graphe du réseau ne comprend aucune boucle élémentaire, c'est-à-dire aucune transition n'ayant la même place en entrée et en sortie.

Définition II.3

Un RdP marqué est un couple <R, M> où :

- R est un RdP
- M est une application qui associe à chaque place p du RdP un nombre de marques

$$M : P \rightarrow IN$$
$$p \rightarrow M(p)$$

M(p) désigne le nombre de marques (jetons) contenues dans la place p. L'application M peut être représentée par un vecteur colonne indicé par les numéros des places.

II.2.1.1 Règle de fonctionnement

Une transition t est franchissable (sensibilisée) si et seulement si :

$$\forall p \in P, \quad M(p) \geq Pre(p,t)$$

Le tir (franchissement) d'une transition t a pour conséquence :

- de retirer Pré (p, t) marques de chaque place d'entrée p de la transition t,
- d'ajouter Post (p, t) marques dans chaque place de sortie p de la transition t.

Le franchissement d'une transition t provoque le passage d'un marquage M à un autre marquage M' tel que :

$$\forall p \in P, \; M'(p) = M(p) - Pre(p,t) + Post(p,t)$$

Le vecteur marquage M, est un vecteur de dimension égale au nombre de places. M_0 contient le marquage initial.

D'une façon générale, les RdP sont considérés comme l'outil le plus puissant et le mieux adapté à la modélisation dynamique des systèmes à événements discrets [MUR, 89], [SIL, 96]. Leur application à la modélisation de ces systèmes et particulièrement aux systèmes de production permet de mettre en évidence les propriétés des systèmes représentés et d'effectuer des simulations.

II.2.1.2 Conflit et parallélisme

Conflit structurel : deux transitions t_1 et t_2 sont en conflit structurel si et seulement si elles ont au moins une place d'entrée en commun [VAL, 01]:

$$\exists p / \quad Pre(p,t_1) \times Pre(p,t_2) \neq 0$$

Conflit effectif : deux transitions t_1 et t_2 sont en conflit effectif pour un marquage M si et seulement si t_1 et t_2 sont en conflit structurel et que :

$$M \geq Pre(.,t_1) \;\text{ et }\; M \geq Pre(.,t_2)$$

Parallélisme structurel : deux transitions t_1 et t_2 sont parallèles structurellement si :

$$(\mathrm{Pre}(.,t_1))^T \times \mathrm{Pre}(.,t_2) = 0$$

Elles n'ont donc aucune place d'entrée commune (le produit scalaire de leurs vecteurs Pre est nul).

Parallélisme effectif : deux transitions t_1 et t_2 sont parallèles pour un marquage donné M si et seulement si elles sont parallèles structurellement.

II.2.1.3 Propriétés

Les RdP autonomes exhibent deux grandes classes de propriétés [MUR, 89] :

- les propriétés dynamiques,
- les propriétés structurelles.

a) Propriétés dynamiques

Ces propriétés dépendent du marquage initial et sont liées à l'évolution du réseau (borné, vivant, réinitialisable, ...).

Définition II.4

Une place p_i est dite bornée pour un marquage initial M_0 s'il existe un entier naturel k tel que, pour tout marquage accessible à partir de M_0, le nombre de marques dans p_i est inférieur ou égale à k (on dit que p_i est k-bornée).

Un RdP autonome est sauf s'il est 1-borné.

Définition II.5

Un RdP autonome marqué est borné pour un marquage initial M_0 si toutes les places sont bornées pour M (le réseau est k-borné si toutes les places sont k-bornées).

Supposons que R est un RdP autonome et M_0 est le marquage initial de R, le problème d'accessibilité d'un marquage consiste à trouver si un marquage M est accessible depuis M_0 dans R.

Définition II.6

Un RdP autonome marqué (R, M_0) est vivant si et seulement si, pour tout marquage accessible M et pour toute transition t, il existe une séquence de franchissement qui contient t.

La vivacité d'un réseau garantit le franchissement de toute transition quel que soit le marquage atteint. La propriété de vivacité est une propriété forte, souvent difficile à vérifier [MUR, 89], [LAF, 91].

Un blocage est un marquage tel qu'aucune transition n'est validée.

b) Propriétés structurelles

Les propriétés structurelles sont indépendantes du marquage initial et sont liées à la topologie du réseau. Leur analyse repose essentiellement sur les techniques d'algèbre linéaire [TCS, 97] et leur but est de bâtir une passerelle entre la structure du réseau étudié et son comportement.

Pour un RdP autonome avec (n) transitions et (m) places, la matrice d'incidence $W = [w_{ij}]$ est une matrice (m x n), définie par :

$$W = [w_{ij}] = \mathrm{Post}(p_i, t_j) - \mathrm{Pre}(p_i, t_j)$$

De la matrice d'incidence du réseau, les notions d'invariants peuvent être définies :

– Un p-invariant (p-semi-flot) est un vecteur entier positif X de dimension n vérifiant :

$$X^T.W = 0$$

Soient X un p-invariant et M_0 le marquage initial d'un RdP autonome. Quel que soit le marquage M accessible à partir de M_0, nous avons :

$$X^T.M_0 = X^T.M$$

Cette dernière relation traduit la conservation du nombre pondéré de marques. Elle exprime qu'une certaine combinaison linéaire entre les jetons figurant dans les places d'un p-invariant, pour tous les marquages accessibles de M_0, est constante.

Un RdP est dit conservatif si toutes les places du graphe forment une composante conservative.

– Un t-invariant (t-semi-flot) est un vecteur entier positif Y de dimension m vérifiant :

$$W.Y = 0$$

Soit S une séquence de franchissement, à partir de M_0, et $\underline{s}$ son vecteur caractéristique. Si $\underline{s} = Y$ est un t-invariant, le marquage M obtenu en franchissant la séquence S est tel que : $M = M_0$

Ce résultat traduit le fait que S est une séquence cyclique, c'est-à-dire que son franchissement ramène au marquage initial du réseau (le réseau est alors réinitialisable).

Un RdP est dit consistant s'il possède un T-invariant θ couvrant toutes les transitions du réseau. Un RdP qui possède cette propriété est dit répétitif ou réinitialisable.

II.2.1.4 Graphes d'Evénements

Un Graphe d'Evénements (GE) est un RdP pour lequel chaque place a une transition d'entrée et une transition de sortie. Il se caractérise par l'absence de conflits structurels.

En d'autres termes, toute transition franchissable pour un marquage quelconque reste franchissable tant qu'elle n'est pas tirée, et ceci quelle que soit l'évolution ultérieure du réseau [HIL, 89].

Définition II.7

Un GE est dit Fortement Connexe (GEFC) si et seulement si, il existe un chemin orienté qui relie tout couple de sommet.

Les GEFC sont un outil particulièrement approprié pour la modélisation d'ateliers manufacturiers en fonctionnement répétitif [LAF, 91]. Comme les procédés qui nous intéressent présentent des contraintes de synchronisation et seront en fonctionnement répétitifs, c'est cette classe de RdP que nous exploiterons en priorité.

Définition II.8

Un Graphe d'Evénements Valué (ou à arcs valués, GEV) [COM, 71], est un graphe d'événements tel que le poids associé à chaque arc est supérieure ou égal à 1.

II.2.1.5 Conclusion

En définitive, l'ensemble des propriétés souhaitées est assuré lorsque le modèle est un GEFC ayant un marquage initial. Si nous supposons qu'une première étape d'ordonnancement cyclique a fourni ce GEFC, il n'existe plus de problème de choix à résoudre.

Lorsque la résolution des choix est faite, en ce qui concerne la gestion du temps, une série de problèmes s'annonce : l'évaluation des performances, la modélisation des contraintes temporelles, la synthèse d'une commande temporelle (c'est-à-dire le réglage des instants de tirs des transitions), la vérification du respect des contraintes etc. Les outils permettant de traiter cette problématique feront l'objet de la section qui va suivre.

II.2.2 RdP temporels

Dans ce cadre, on s'intéresse à l'étude des principaux types de RdP utilisés pour la modélisation des systèmes à contraintes temporelles.

Dans la littérature nous pouvons trouver trois grandes classes de modèles temporisés. Ces différentes classes se singularisent par l'objet sur lequel la contrainte temporelle est introduite :

- les RdP temporisés: le temps est représenté par des durées (nombres rationnels positifs ou nuls) associées aux transitions [RAM, 74] ou aux places [SIF, 77],

- les RdP temporels : le temps est représenté par un intervalle $[a_i, b_i]$ associé à la transition [MER, 74] ou à la place [KHA, 96],

- les RdP temporel à flux: le temps est représenté par un intervalle associé à l'arc [DIA, 01].
  Il existe deux formes de RdP temporels :

- les RdP t-temporels qui associent un intervalle temporel de sensibilisation aux transitions et une horloge globale au RdP. Ces modèles sont principalement utilisés pour l'étude des systèmes de télécommunication [MER, 74] ou pour modéliser l'interface entre le modèle discret et le modèle continu lors de la modélisation des systèmes batch [AND, 96].

- les RdP P-temporels [KHA, 97] qui associent un intervalle de temps aux places. Ces intervalles temporels spécifient des durées de séjour.

II.2.2.1 RdP t-temporels

II.2.2.1.1 Modèle de Merlin

Le modèle de Merlin [MER, 74], communément appelé RdP t-temporel, a été conçu pour l'étude des problèmes de recouvrement pour les protocoles de communication. Dans ce modèle, à chaque transition est attachée une contrainte temporelle de type intervalle, et non plus ponctuel comme dans le modèle t-temporisé.

L'intervalle associé à la transition t est relatif au moment où la transition devient validée, soit [a, b] cet intervalle. Supposons que t soit validée à l'instant τ, alors elle peut être franchie dans l'intervalle matérialisé par les quantités $(a + \tau)$ et $(b + \tau)$, sauf si elle est "désensibilisée" à cause du franchissement d'une autre transition avec laquelle elle était en conflit.

Définition II.8

Un RdP t-temporel est un doublet < R, IS > où :

- R est un RdP marqué,
- IS : $T \rightarrow Q^+ \times (Q^+ \cup \{+\infty\}$ est la fonction d'intervalle statique, qui à chaque transition t_i associe son intervalle statique $IS_i = [a_i, b_i]$ ($0 \leq a_i \leq b_i$), à bornes rationnelles de tir.

Une transition t_i ne peut être franchie que entre a_i et b_i unités de temps (u.t.)

Une transition t_i doit être sensibilisée (validée) pendant au moins a_i u.t. avant de pouvoir être tirée et ne peut rester validée au-delà de b_i u.t. sans être tirée. Le tir d'une transition est alors de durée nulle (instantané).

A/ Règle de fonctionnement

Le comportement d'un RdP t-temporel peut être caractérisé par la notion d'état. Un état est une paire E = (M, I) dans lequel :

- M est un marquage,
- I est l'application qui associe à chaque transition t de T, son intervalle de tir.

L'intervalle de tir considéré sera alors qualifié d'intervalle dynamique. En effet, ce dernier peut différer de l'intervalle statique, comme l'illustre la figure II.1.

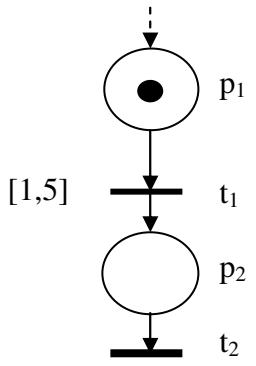


Figure II.1: Portion de RdP t-temporel

Considérons pour origine des temps, l'instant où le jeton vient d'arriver dans la place p_1. Pour la représentation fournie, où seule la transition t_1 est sensibilisée, son intervalle dynamique correspondra à son intervalle statique [1, 5].

Supposons maintenant qu'après τ unités de temps ($\tau < 5$) la marque soit toujours contenue dans p_1, l'intervalle dynamique associé à t_1 correspondra alors à l'intervalle défini par : $[\max(0, 1 - \tau), 5 - \tau]$.

L'état initial est défini par $E_0 = (M_0, I_0)$, où M_0 est le marquage initial, et I_0 est l'application qui associe à chaque transition son intervalle statique de tir, si cette transition est sensibilisée par M_0, et l'intervalle vide si non. Formellement I_0 est définie par :

$$I_0(t) = \begin{cases} IS(t) \text{ si } \forall p : M(p) \geq Pre(p,t) \\ \phi \text{ si non} \end{cases}$$

B/ Calcul de l'état suivant

Une transition t est franchissable, à une date relative τ, depuis un état E = (M, I) si et seulement si les conditions suivantes sont satisfaites :

- la transition t est validée par le marquage M au sens des RdP autonomes,
- τ est compris (bornes incluses) entre la date de tir au plus tôt de t et la plus petite des dates de tir au plus tard des autres transitions validées (dans l'état E).

La première condition est celle qui autorise le tir dans les RdP ; la dernière résulte de l'obligation de tirer les transitions dans leurs intervalles de tir. Le tir d'une transition t franchissable depuis un état E = (M, I) à un instant τ, conduit au nouvel état E' = (M', I'), déterminé par un nouveau marquage M':

$$\forall p \in P,\ M'(p) = M(p) - Pre(p,t) + Post(p,t)$$

Les nouveaux intervalles de tir I' :

- I' = ϕ pour toutes les transitions non- sensibilisées par le marquage M',
- I' $=[a'_j, b'_j] = \max[(0, a_j - \tau), b_j - \tau]$ pour toutes les transitions t_j sensibilisées par le marquage M et non en conflit avec la transition t,
- I' = IS_i (l'intervalle statique $[a_i, b_i]$) pour les autres transitions t_i.

II.2.2.1.2 Cas particulier des RdP à chronomètres

Les RdP temporels à chronomètres [BER, 05] est un outil qui permet de modéliser l'interruption et la reprise des tâches, cet outil n'importe pas de valeur ajoutée pour nos ateliers qui traitent des produits agroalimentaires : on ne peut pas interrompre et reprendre le déroulement d'un processus chimique comme on le ferait pour un processus informatique. Les possibilités offertes par ces outils correspond donc à des scénarii qui n'existent pas (ou vraiment rarement) pour les types d'ateliers que nous considérons.

II.2.2.1.3 Conclusion

En fait, les RdP t-temporels sont historiquement utilisés pour l'étude des systèmes de télécommunication [MER, 74] ou pour modéliser l'interface entre le modèle discret et le modèle continu lors de la modélisation des systèmes batch [AND, 96]. Il serait donc injuste de s'offusquer de ce que leur architecture ne soit pas idéalement appropriée à toutes les problématiques. Il reste que les RdP t-temporels demeurent probablement le meilleur outil de spécification des protocoles et processus temporels. Les outils mathématiques de la littérature sont nombreux. Le fonctionnement au plus tôt est toujours réalisable et la plupart des travaux en rapport sont assez directement exploitables.

La section suivante montrera comment les RdP P-temporels capturent analytiquement ce type d'exigences au sein de la structure des modèles.

II.2.2.2 RdP P-temporels

Définition II.9

Un RdP P-temporel [KHA, 97], est donné par le doublet < R, IS>, où :

- R est un RdP marqué,
- IS : $P \rightarrow Q^+ \times (Q^+ \cup \{+\infty\})$
  $p_i \rightarrow IS_i = [a_i, b_i]$ avec $0 \leq a_i \leq b_i$.

IS_i définit l'intervalle statique de temps de séjour d'une marque dans la place p_i appartenant à l'ensemble des places P. Une marque dans la place p_i participe à la validation de ses transitions de sortie que si elle a séjourné au moins la durée a_i dans cette place. Elle doit quitter la place p_i, donc franchir l'une des transitions de sortie au plus tard quand sa durée de séjour devient égale à b_i. Après ce temps (b_i), la marque sera « morte » et ne participera plus à la validation des transitions.

Nous voyons que l'une des principales caractéristiques du modèle est la notion de réseau marque(s)-morte(s) ou bien de séquence de tir marque(s)-vivante(s).

II.2.2.2.1 Règle de fonctionnement

Pour déterminer le fonctionnement d'un RdP P- temporel, il faut caractériser la situation du réseau à un instant donné. Cette situation peut être caractérisée en utilisant la notion d'état.

Définition II.10

A un instant donné, l'état est totalement déterminé par la paire E = < M, I > telle que [KHA, 97] :

- M est une application de marquage, assignant à chaque place du réseau un certain nombre de marques ($\forall p \in P,\ M(p) \geq Pre(p,t)$);

- I est une application "intervalle potentiel" de tir, associant à chaque marque k dans une place p_i un intervalle $[a_i^k, b_i^k]$. On rappellera "intervalle dynamique" pour le distinguer de l'intervalle statique (initial) associé à la place qui contient cette marque. Ces intervalles (les intervalles dynamiques) sont relatifs à l'instant d'arrivée de la marque dans la place. Supposons que la marque k arrive dans la place p_i (son intervalle statique est $[a_i, b_i]$) à l'instant c, à l'instant c+d ($a_i \leq d \leq b_i$) l'intervalle dynamique de k est $[a'^k_i, b'^k_i] = [\max(a_i - d, 0), b_i - d]$.

Le tir d'une transition dépend des intervalles dynamiques associés aux marques dans toutes ses places d'entrée. Par conséquent, la connaissance de l'intervalle dynamique associé à une marque dans une de ses places d'entrée ne donne pas les informations suffisantes sur le tir de cette transition (on a besoin de tous les intervalles dynamiques associés aux marques dans ses places d'entrée). C'est la raison pour laquelle on a utilisé le mot "potentiel" dans la définition précédente.

Définition II.11

A un instant donné, l'état caractérisant la situation du réseau est défini par un doublet E= <M, Q>, où :

- M est l'application de marquage du réseau identique à la définition précédente,
- Q est une application temps de séjour qui associe à chaque marque k dans la place p_i un nombre réel q_i^k où q_i^k est l'âge de cette marque (le temps écoulé depuis son arrivé dans la place p_i). Le q_i^k associé à une marque k dans la place p_i doit être inférieur ou égal à b_i où $[a_i, b_i]$ est l'intervalle statique associé à la place p_i. La marque k dans la place p_i peut participer à la validation de ses transitions de sortie quand son âge q_i^k est supérieur ou égal à a_i. Elle est morte quand son âge est strictement supérieur à b_i.

L'âge q_i^k d'une marque k (donné par une horloge locale associée à celle-ci) est relatif à l'instant d'arrivée de cette marque dans la place p_i. Supposons que la marque k arrive dans la place p_i à l'instant τ (donné par une horloge globale par exemple), l'âge de cette marque à cet instant est égal à zéro. A l'instant absolu τ', son âge est $q_i^k = \tau' - \tau$. Elle ne participe à la validation des transitions de sortie de la place qui la contient, qu'à partir de l'instant $\tau' = \tau' + a_i$, et elle est morte dès l'instant $\tau' > \tau' + b_i$. Une marque est morte si son âge devient strictement

supérieur à la borne supérieure de l'intervalle statique associé à sa place d'accueil et si aucune de ses transitions de sortie n'est validée à cet instant.

Une transition peut donc être validée au sens des RdP autonomes et ne pas l'être au sens des RdP P-temporels à cause des contraintes de temps.

Une marque peut avoir trois états comme l'indique la figure II.2 :

- marque non disponible,
- marque disponible,
- marque morte.

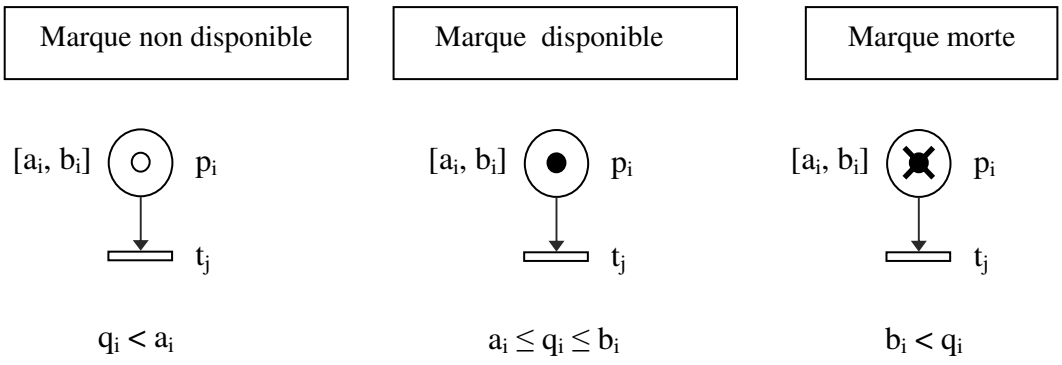


Figure II.2 : Différents états d'un jeton dans un RdP P-temporel

L'intérêt des RdP réside dans le fait qu'ils permettent l'analyse ainsi que l'étude des comportements des systèmes qu'ils modélisent. Dans le cas des RdP P- temporels, deux approches différentes permettent d'analyser le comportement et l'étude des propriétés d'un réseau : approche « intervalle de temps » et approche « âge de marques ». La première permet une meilleure étude du comportement alors qu'il est préférable d'utiliser la seconde pour l'analyse des propriétés d'un réseau.

II.2.2.2.2 Condition de tir d'une transition

Pour les RdP P-temporels, la détermination de l'intervalle de tir d'une transition est plus compliquée. On détermine l'intervalle potentiel de tir d'une transition en ne considérant que, dans un premier temps, les intervalles potentiels associés aux marques dans les places d'entrée de cette transition. On détermine, dans un second temps, l'intervalle réel de tir de cette transition en considérant cette fois ci tous les intervalles potentiels associés aux marques dans les autres places.

Définition II.12

Une transition t_l est potentiellement tirable (validée au sens des RdP P-temporels) à partir de l'état E(M, Q) si et seulement si :

– elle est validée au sens des RdP autonomes dans cet état, c'est-à-dire :

$$\forall\ p_i \in {}^\circ t_l,\ M(p_i) \geq I(p_i, t_l)$$

– $\forall\ p_i \in {}^\circ t_l$, il existe au moins $I(p_i, t_l)$ marques dans cette place tel que :

$$\min(b_i - q_i^k) - \max(0, \max(a_i - q_i^k)) \geq 0$$

où k=1, 2, …, $Pre(p_i, t_l)$ et $[a_i, b_i]$ est l'intervalle statique associé à la place p_i.

De plus, il n'existe pas de marques j (qui ne participent pas au franchissement de la transition t_l) tel que :

$$(b_i - q_i^j) \leq \max(0, \max(a_i - q_i^k))$$

Si non cette marque est morte. Il est associé alors à cette place l'intervalle :

$$[\max(0, \max(a_i - q_i^k)), \min(b_i - q_i^k)]$$

L'intersection de tous ces intervalles (pour chaque place d'entrée de t_l, on associe un intervalle) donne l'intervalle dans lequel la transition reste potentiellement tirable.

II.2.2.2.3 Calcul de l'état suivant

Définition II.13

L'état E'(M', Q') est un état accessible à partir de l'état E (M, Q) par l'écoulement d'un temps τ si et seulement si :

1- M'=M,
2- $\forall$ j une marque dans la place p_i, $q_i'^j = q_i^j + \tau \leq b_i$ où q_i^j (respectivement $q_i'^j$) est l'âge de la marque j dans l'état E (respectivement dans l'état E') et b_i est la borne supérieure de l'intervalle statique associé à la place p_i.

Définition II.14

L'état E'(M', Q') est un état accessible à partir de l'état E (M, Q) par le franchissement d'une transition t_i si et seulement si :

1- t_i est directement franchissable (les âges de toutes les marques qui valident t_i sont supérieures ou égaux aux bornes inférieures des intervalles statiques associés à leurs places) à partir de E,
2- $\forall$ p$\in$P, $M'(p)=M(p) - Pre(p, t_i) + Post(t_i, p)$,
3- les marques qui ne se déplacent pas, gardent les mêmes âges dans E et E' (on suppose que la durée de franchissement d'une transition est nulle). Les marques qui sont déplacées ou créées prennent l'âge zéro.

La règle de tir précédente permet de calculer les états et les relations d'accessibilité entre eux. L'ensemble des séquences de tir réalisables (séquences de transitions et dates de tir associées) depuis l'état initial caractérise le comportement du RdP P-temporel.

II.2.2.2.4 Propriétés

Définition II. 15

Un état E (M, Q) d'un RdP P- temporel est marques-vivantes si toutes les marques dans M sont vivantes.

Définition II.16

Un RdP P-temporel est marques-vivantes pour un marquage initial M_0 (l'état initial E_0) si tous les marquages accessibles depuis M_0 sont des états marques-vivantes.

Si une marque dans un marquage d'un état accessible depuis E_0 est morte, le réseau est marques-mortes. Une marque morte ne participe plus à la validation des transitions.

Le mécanisme de synchronisation est la raison de la mort des marques. Une marque morte signifie le non respect des spécifications et la rupture du cahier des charges. Il existe deux causes à travers lesquelles on peut avoir une mort de marques en amont d'une transition de synchronisation t :

- Les marques sur les circuits qui la contiennent n'arrivent pas à des instants compatibles dans ses places d'entrée. La figure II.3.a donne la représentation des contraintes imposées par le circuit.

- Les marques, sur les chemins élémentaires orientés d'une transition de parallélisme à t, n'arrivent pas à des instants compatibles en amont de t. La représentation des contraintes imposées par les chemins est donnée par la figure II.3.b.

Il est à noter que les chemins qui ne sont pas élémentaires sont un mélange de ces deux possibilités.

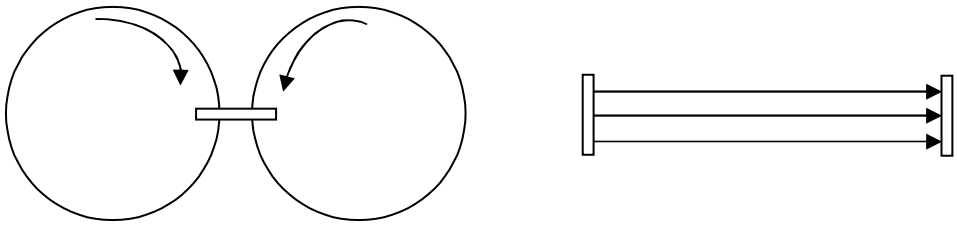


Figure 3.a Figure 3.b

Figure II.3 : Structures pouvant entraîner la mort d'une marque [KHA, 97]

Définition II.17

Une séquence de franchissements (constituée des transitions et des dates des franchissements associés (s, u)) est appelée séquence marques-vivantes (m-v-séquence) si et seulement si tous les états accessibles par cette séquence sont des états marques-vivantes [KHA, 96].

Définition II.18

Une séquence de franchissements (s, u) est répétitive si pour un état E accessible depuis l'état initial du réseau [DAV, 92], E est accessible depuis E par franchissement des transitions de (s, u).

Définition II.19

Une séquence de franchissements (s, u) est complète si elle contient toutes les transitions du réseau [DAV, 92].

II.2.2.2.5 RdP P-temporels commandés

En s'inspirant de la définition de Long des RdP commandés [LON, 93b], un RdP P-temporel commandé (R_{PC}) est défini de la manière suivante : $R_{PC}=(R_P, \varphi, U, U_0)$ tels que :

- R_P est un RdP P-temporel qui décrit le système en boucle ouverte,
- φ est une application de l'ensemble des places de R_P vers l'ensemble des opérations Γ : $\varphi : P \rightarrow \Gamma$,
- U est la commande externe sur les transitions de R_P, construite à partir des prédicats utilisant l'occurrence d'événements observables internes ou externes au système : $U : T \rightarrow \{0, 1\}$,
- U_0 est la valeur initiale du vecteur des prédicats.

L'ensemble des transitions est décomposé en quatre sous-ensembles suivant que les transitions sont commandables ou observables :

$T = T_C \cup T_{UC} \cup T_O \cup T_{UO}$,
T_C : l'ensemble des transitions commandables,
T_{UC} : l'ensemble des transitions non commandables,
T_O : l'ensemble des transitions observables,
T_{UO} : l'ensemble des transitions non observables.

Une transition est dite observable si la couche de commande sait si elle est tirée ou non sans qu'aucun calcul ne soit effectué [COL, 97]. Cela correspond notamment au cas où un capteur détecterait directement la fin ou le début d'une action.

Une transition $t \in T$ est dite « état validé » pour le marquage M si elle est validée dans R_P pour M.

Une transition t est dite « commande validée » si U(t) = 1. Par définition, les transitions non commandables sont toujours commande validée.

Pour être mise à feu, une transition doit être « état validé » et « commande validée ». Ce franchissement consiste à :

– retirer une marque de chacune de ses places d'entrée et rajouter une marque dans chacune de ses places de sortie,

– effectuer les opérations $\varphi(p)$ associées à ses places de sortie.

II.2.2.2.6 Conclusion

Les RdP P-temporels imposent naturellement l'obligation de franchissement de toutes les transitions du réseau. Par conséquent, les instants d'arrivée des marques dans les places qui sont des places d'entrée de transition de synchronisation doivent être compatibles. Ainsi, les RdP P-temporels modélisent les temps de séjour minimum et le temps de séjour maximum des marques dans toutes les places du réseau (même celles qui sont en amont des transitions de synchronisation). Ceci n'est pas possible avec les autres modèles RdP basiques.

L'état d'un RdP temporel est donc défini par le marquage courant et par la valeur des horloges associées aux marques ce qui a des conséquences très négatives sur la complexité de l'analyse. La formulation de l'évaluation de performance d'un GE est par exemple notoirement plus sophistiquée [COL, 08]. Cet inconvénient n'est cependant dû qu'à la complexité effective du problème modélisé.

En définitive, les RdP P-temporels permettent de capturer les exigences temporelles dans la structure du modèle [DEF, 08a]. Dans le cas des GEFC, des algorithmes permettent de calculer, le temps de cycle, les instants de tirs et les marges de fonctionnement du système en fonctionnement monopériodique en des temps polynomiaux [KHA, 97]. Aucun outil de la littérature ne présente des résultats semblables.

La troisième section de ce chapitre se concentre sur l'application des RdP P- temporels aux ateliers manufacturiers à contraintes de temps. Il est certes intéressant de présenter une série d'applications effectives, en même temps que l'on présente cet outil.

II.3 Atelier à contraintes de temps

Les ateliers, où le facteur temps est un paramètre critique, sont communément désignés : ateliers à contraintes de temps. Ce type d'ateliers fait appel à des procédés dont les temps opératoires doivent être compris entre des minima et des maxima. Les durées des opérations sont alors spécifiées par des intervalles de temps. Le respect de ces contraintes est imposé par une gamme opératoire spécifique à chaque produit. L'étude menée dans le cadre de cette thèse se restreint à la production en très grande série où le fonctionnement peut être considéré comme répétitif. Deux types d'atelier seront présentés :

- Atelier multi-produits: cet atelier traite des produits de plusieurs gammes différentes sans envisager l'existence de synchronisation entre les flux de produits. En d'autres termes, il n'y a pas de postes d'assemblage.

- Atelier de production laitière : cet atelier est caractérisé par une seule gamme de production, avec postes d'assemblage.

La taille des deux systèmes étudiés est potentiellement très importante. Nous cherchons alors à construire un modèle permettant de décomposer l'étude en sous problèmes élémentaires. Après la description de la structure des deux ateliers étudiés ainsi que toutes ses contraintes de production, un modèle, utilisant le formalisme des RdP P-temporels, est détaillé et analysé tout en s'appuyant sur les approches de l'état de l'art [HIL, 89], [LON, 93b] et [JER, 09b].

II.3.1 Atelier multi-produits

II.3.1.1 Présentation de l'atelier

L'atelier considéré correspond, au niveau des hypothèses, à celui étudié dans la thèse d'Hillion [HIL, 89]. La seule différence est la présence, dans notre cas, de contraintes de temps de séjour nécessitant l'utilisation des RdP P-temporels à la place des RdP temporisés. Rappelons ensuite que le problème de l'allocation des ressources ou de l'ordonnancement n'est pas étudié dans ce recueil et que seule l'étude de la robustesse nous concerne. Nous mentionnons aussi les travaux de Long qui fournissent un formalisme plus orienté vers la synthèse de commande d'ateliers [LON, 93a].

II.3.1.2 Approche classique

Nous supposons que les systèmes étudiés sont :

- des ateliers multi-produits sans postes d'assemblage (pas de synchronisation entre les flux),
- ordonnancés,
- à fonctionnement cyclique monopériodique,
- avec partage dynamique des machines entre les gammes des différents produits.

Nous supposons aussi que les ressources de transport (chariot, palettes, balancelles, etc.) sont en nombre limité et sont supposées ne charger qu'une seule pièce à la fois. Les temps de séjour dans les places n'ont pas la même signification fonctionnelle lorsqu'ils sont associés à des places des gammes opératoires ou à des places représentant des ressources libres. En utilisant [LON, 93b], une décomposition fonctionnelle du RdP en quatre ensembles est établie [JER, 09b] :

- R_U : ensemble des places représentant les machines utilisées,
- R_N : ensemble des places représentant les machines non utilisées,
- $Trans_C$: ensemble des places de transfert chargées ou encore ensemble des places modélisant chacune l'utilisation d'une ressource de transport pour le transfert d'un produit,
- $Trans_{NC}$: ensemble des places de transfert non chargées ou encore ensemble des places modélisant chacune un déplacement d'une ressource de transport à vide. Il désigne aussi l'ensemble des places représentant les stocks des pièces non traitées.

Remarques

- Au niveau du cahier des charges, aucune contrainte temporelle n'est associée aux places appartenant à l'ensemble R_N.

- Les gammes opératoires des différents produits n'imposent aucune contrainte temporelle sur les places de l'ensemble $Trans_{NC}$.

- Les temps associés aux places des ensembles R_N et $Trans_{NC}$ peuvent être modifiés en temps réel, sans que la qualité de la production ne se trouve impactée. Cette caractéristique est fondamentale dans le calcul la robustesse.

Exemple II.1 [JER, 09b]

Soit l'atelier de la figure II.4. Il est composé essentiellement de :

- trois machines M_1, M_2 et M_3,
- sept tapis roulants : T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6 et T_7.

Cet atelier est destiné à fabriquer deux types de produits A et B, avec des ratios de 50%. La production envisagée est caractérisée par les deux gammes opératoires suivantes, u.t. désignant l'unité de temps :

GO_1 : Opération 1.1 : M_1 ([15 u.t., 20 u.t.]); Opération 1.2 : M_2 ([2 u.t., 20 u.t.]); Opération 1.3 : M_3 ([15 u.t., 20 u.t.]);

GO_2 : Opération 2.1 : M_2 ([5 u.t., 12 u.t.]); Opération 2.2 : M_1 ([2 u.t., 20 u.t.]);

Les deux gammes opératoires GO_1 et GO_2 possèdent deux machines partagées (M_1 et M_2).

Pour fabriquer le produit A, une pièce non traitée est prise du stock S_1. Elle est transférée par le tapis T_1 à la machine M_1 où elle subit la première transformation. Une fois cette dernière est achevée, la pièce est transportée par le tapis T_7 à la machine M_2 où elle subit la deuxième transformation. Ensuite, la pièce arrive à la machine M_3, par la voie du tapis T_3, pour subir la dernière opération. Enfin, le produit fini A est déposé sur le tapis T_4 à destination du stock des produits finis SA.

Pour fabriquer le produit B, une pièce non traitée est prise du stock S_2. Elle est transférée par le tapis T_2 à la machine M_2 où elle subit la première transformation. Une fois cette dernière est achevée, la pièce est transportée par le tapis T_6 à la machine M_1 où elle subit la deuxième transformation. Enfin, le produit fini B est déposé sur le tapis T_5 à destination du stock des produits finis SB.

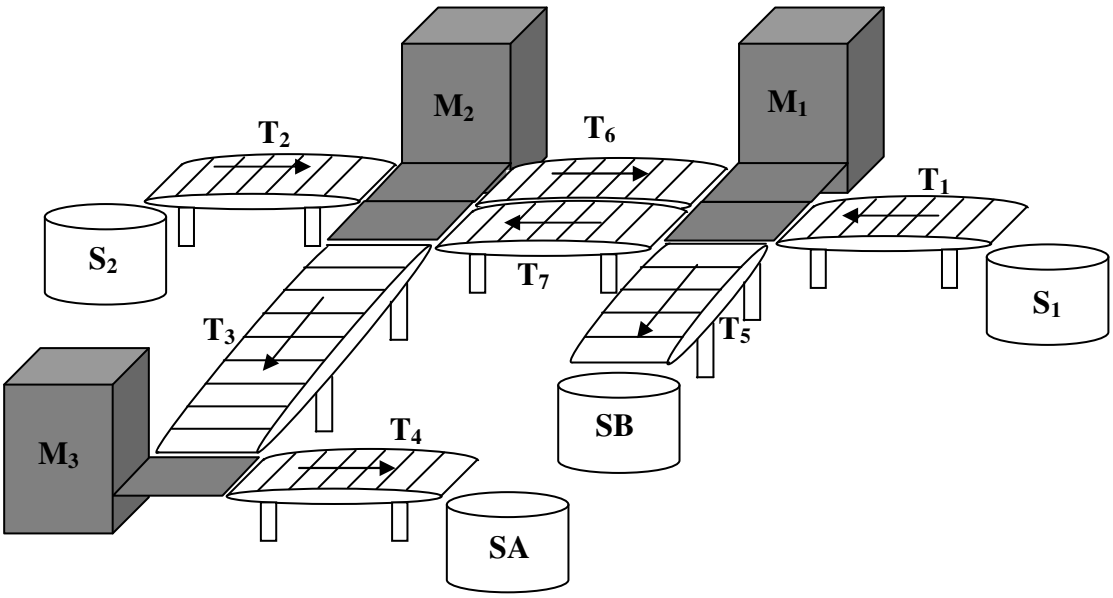


Figure II.4 : Exemple d'un atelier multi-produits

La figure II.5 montre le RdP P-temporel ordonnancé modélisant le processus de fabrication considéré. Rappelons que ce graphe est donné par la couche d'ordonnancement/planification.

Notations

- q_{ie} : le temps de séjour prévu du jeton dans la place p_i, calculé par la couche d'ordonnancement cyclique.
- q_i : le temps de séjour instantané du jeton dans la place p_i.
  Il désigne aussi le temps de séjour effectif dans la place p_i lorsque le jeton est tiré. Ce temps de séjour effectif peut être différent de q_{ie}, suite à une perturbation temporelle ou bien suite à une modification des instants de tir des transitions par la commande dans le but de compenser une perturbation.
- $St_e(n)$: le $n^{ème}$ instant de tir prévu de la transition t.
- $St(n)$: le $n^{ème}$ instant de tir effectif de la transition t.
- IS_i : l'intervalle de temps associé à la place p_i.

Le tableau II.1, donne les intervalles (IS_i) et les temps de séjour prévus (q_{ie}) associés aux différentes places.

Tableau II.1 : Intervalles et temps de séjour prévus

IS_i	q_{ie}
IS_1=[30, 47]	q_{1e}=38
IS_2=[5, 12]	q_{2e}=7
IS_3=[10, 20]	q_{3e}=15
IS_4=[2, 20]	q_{4e}=10
IS_5=[1,+∞]	q_{5e}=10
IS_6=[0, +∞]	q_{6e}=5
IS_7=[0, +∞]	q_{7e}=8
IS_8=[8, +∞]	q_{8e}=13
IS_9=[8, +∞]	q_{9e}=15
IS_{10}=[5, 15]	q_{10e}=12
IS_{11}=[15, 20]	q_{11e}=17
IS_{12}=[3, 7]	q_{12e}=6
IS_{13}=[2, 20]	q_{13e}=5
IS_{14}=[2, 7]	q_{14e}=5
IS_{15}=[15, 20]	q_{15e}=16
IS_{16}=[1, +∞]	q_{16e}=19

En faisant abstraction du régime transitoire, seul le régime permanent est considéré. Par conséquent, les instants initiaux de mise à feu des différentes transitions sont :

$St_{1e}(1)=15$, $St_{2e}(1)=22$, $St_{3e}(1)=37$, $St_{4e}(1)=7$, $St_{5e}(1)=17$, $St_{6e}(1)=12$, $St_{7e}(1)=29$, $St_{8e}(1)=35$, $St_{9e}(1)=0$, $St_{10e}(1)=5$, $St_{11e}(1)=21$ et $St_{12e}(1)=0$.

Le fonctionnement répétitif monopériodique est caractérisé par la période π=40. Il est alors défini sur une fenêtre temporelle de largeur égale au temps de cycle. Cette fenêtre peut

être représentée différemment puisqu'elle peut être déplacée arbitrairement sur l'axe temporel.

La décomposition fonctionnelle envisagée de ce réseau est la suivante (Figure II.6) :

$R_U=\{p_2, p_4, p_{11}, p_{13}, p_{15}\}$, $R_N=\{p_6, p_7, p_8, p_9\}$, $Trans_C=\{p_1, p_3, p_{10}, p_{12}, p_{14}\}$, $Trans_{NC}=\{p_5, p_{16}\}$, $GO_1=(t_{12}, p_{10}, t_6, p_{11}, t_7, p_{12}, t_8, p_{13}, t_9, p_{14}, t_{10}, p_{15}, t_{11})$ et $GO_2=(t_5, p_1, t_1, p_2, t_2, p_3, t_3, p_4, t_4)$.

La gamme opératoire, est alors le chemin qui commence par une transition p^o appartenant à $Trans_{NC}{}^\circ$ et qui se termine par la transition $^\circ p$ appartenant à $^\circ Trans_{NC}$, sans passer par une place de R_N.

Les jetons, qui figurent dans les places appartenant à $Trans_{NC}$, modélisent des ressources de transport disponibles. Les jetons dans les places de la gamme opératoire correspondent aux en-cours dans le système (pièce + ressource de transport).

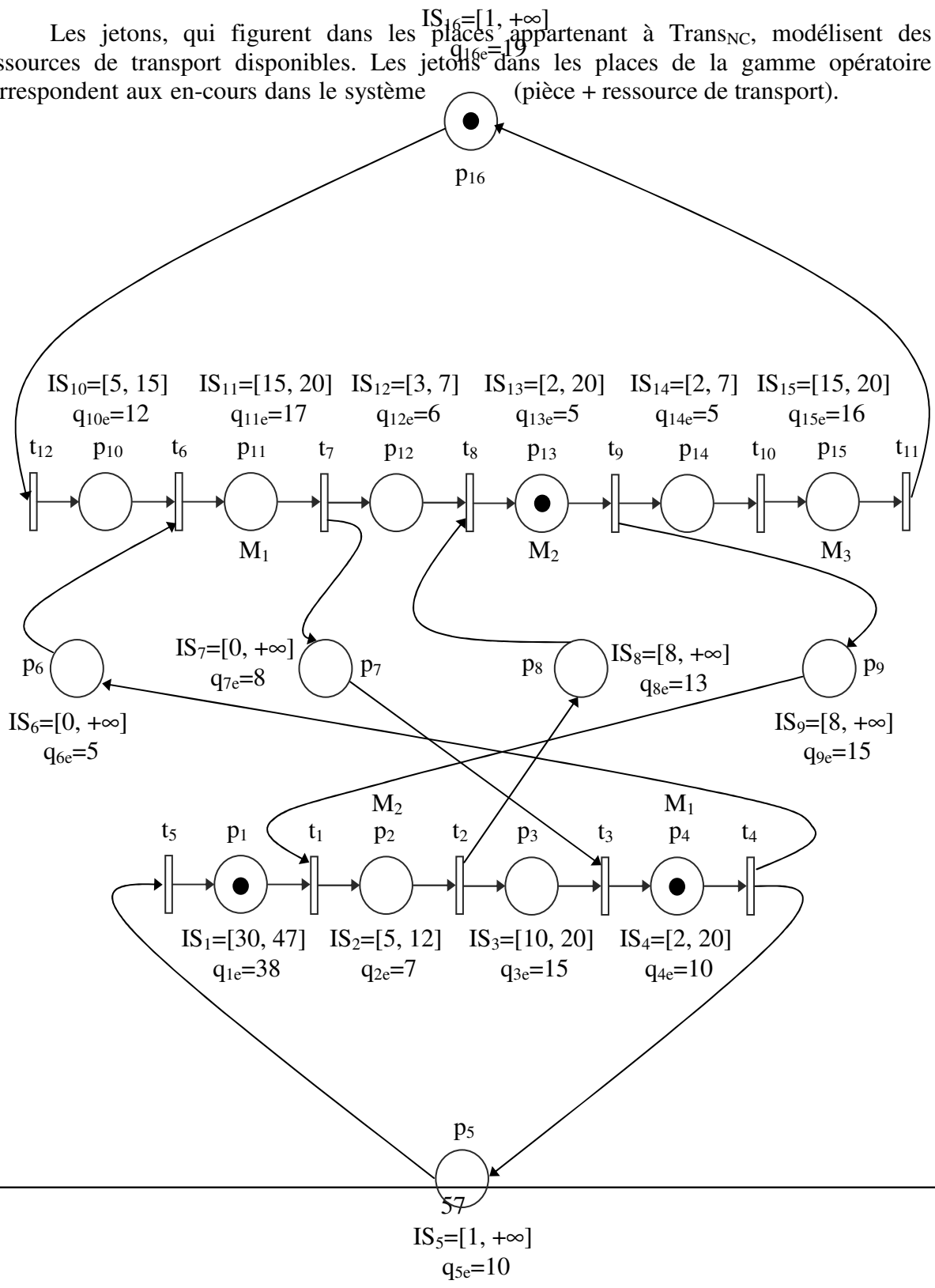


Figure II.5 : Modélisation d'un atelier multi- produits par un RdP P-temporel [JER, 08]

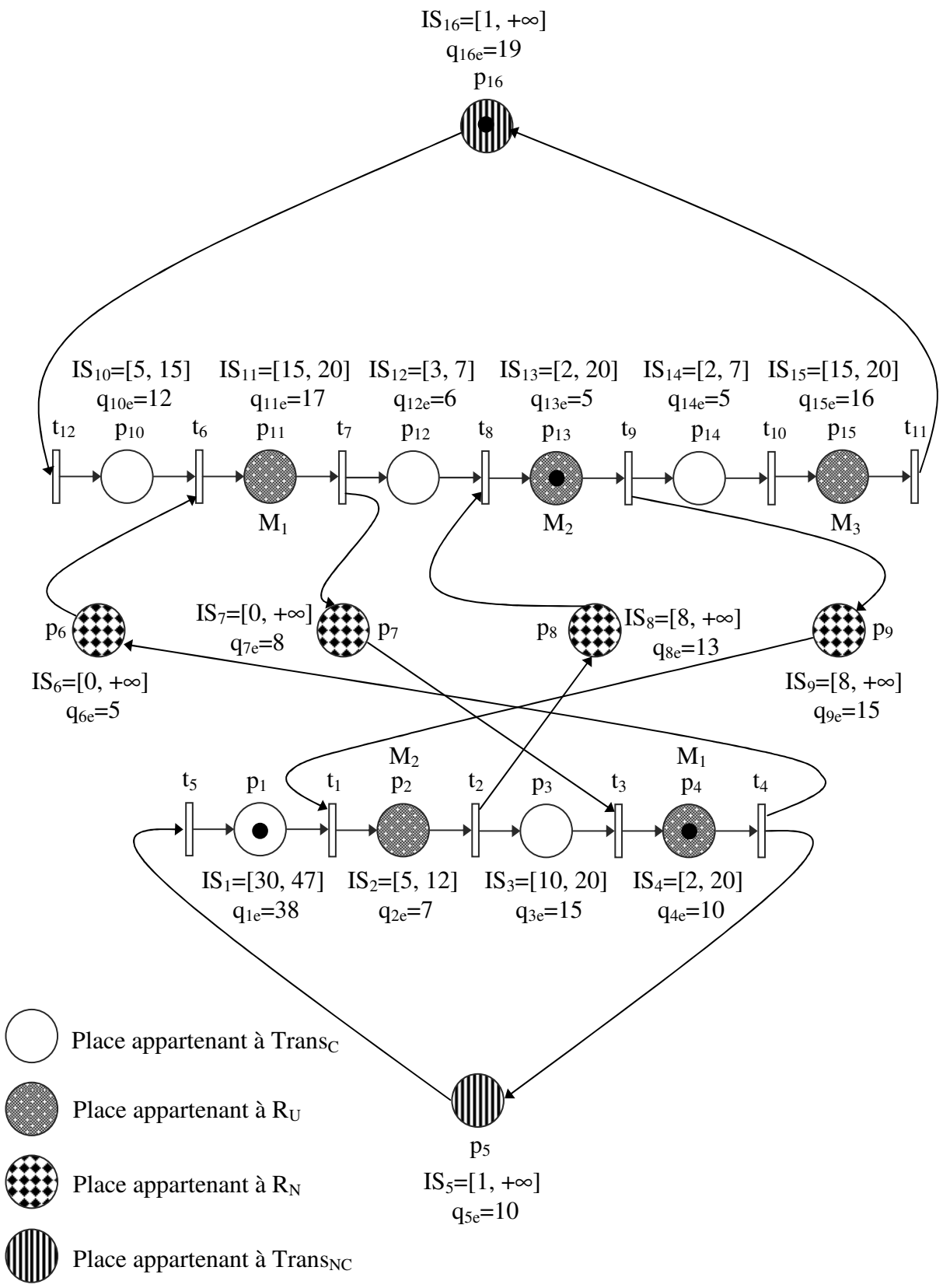


Figure II.6 : Décomposition fonctionnelle [JER, 09b]

II.3.2 Atelier de conditionnement de lait

II.3.2.1 Structure de l'atelier

Le système de production de l'usine est constitué d'une, figure II.7 :

- ligne bouteille qui représente l'objet de notre étude. Une description détaillée du principe de fonctionnement est présenté dans la section suivante,
- ligne UHT.

A/ Ligne UHT

Le procédé UHT consiste à stériliser des aliments en les portant à haute température rapidement et brièvement pour ensuite les refroidir afin de conserver leurs valeurs nutritives, leurs saveurs et leurs goûts. Ce traitement UHT sert à stériliser les aliments avec l'emballage aseptique, il permet de produire des aliments qui se conservent longtemps. Ces aliments n'exigent aucune réfrigération, ce qui permet des économies sur les coûts de transport et d'entreposage. La ligne UHT est constituée de :

- **PT/8 :** la PT/8 est placée avant la TBA/8, son rôle est de poinçonner les paquets du lait, et d'appliquer une languette intérieure appelée « patch », et une languette extérieure appelée « pull tab ».
- **TBA/8 :** Provenant de la PT/8, le matériau d'emballage sera désinfecté dans le bain de peroxyde d'hydrogène chaud. Après séchage, le papier d'emballage passe à l'unité de remplissage.
- **La chaîne :** elle a pour rôle de transporter les paquets de laits d'une poste à une autre entre la TBA/8 et la TCA/21, ensuite entre la TCA/21 et la Mariani.
- **La TCA/21 :** elle applique à chaque paquet son bouchon tout en collant ce dernier avec une colle spéciale.
- **La Mariani :** elle assure les emballages en paquets de 6.Après, les emballages seront évacués vers un opérateur qui a pour rôle de les placer sur une palette en bois selon une disposition bien déterminée.

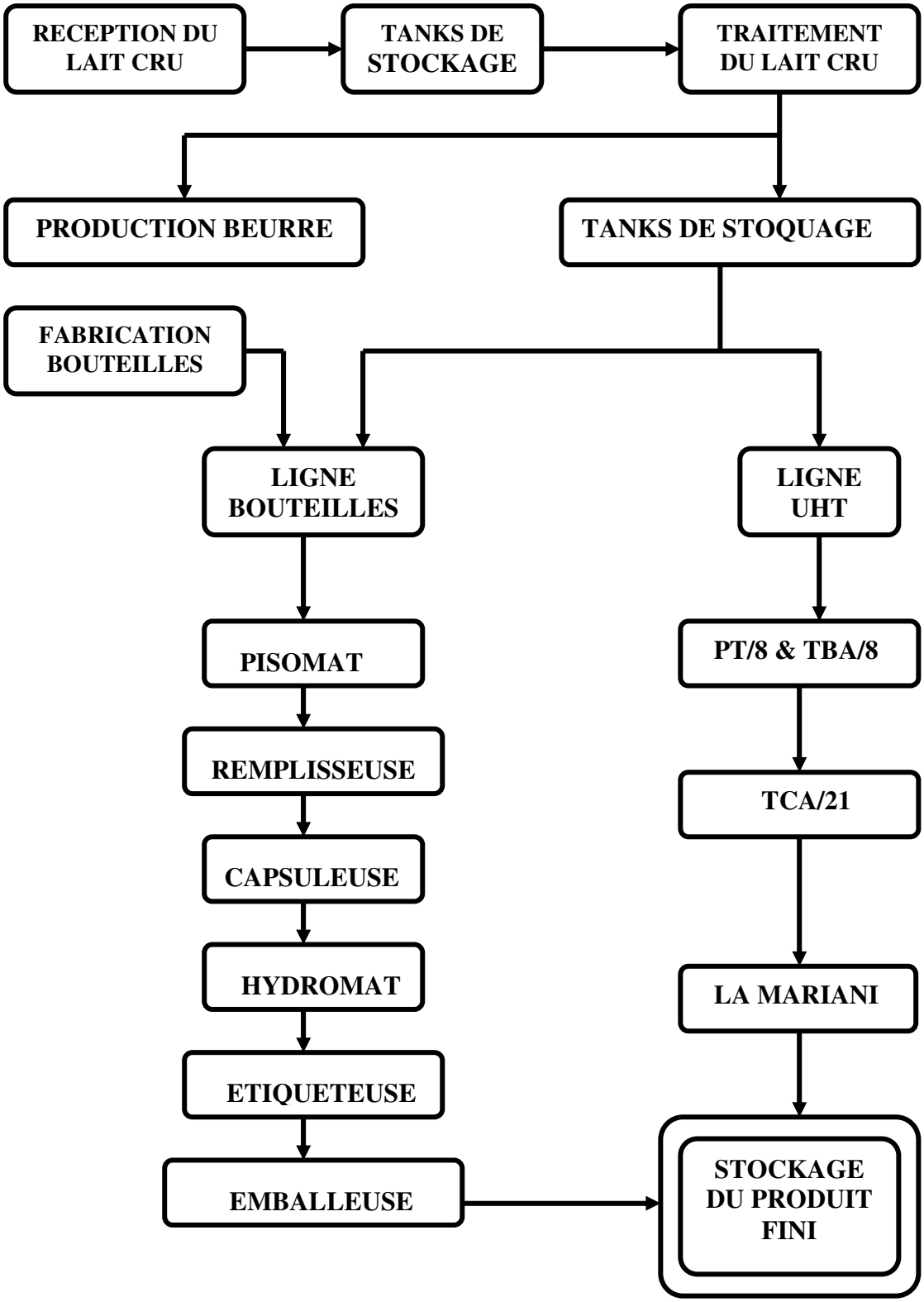


Figure II.7 : Structure d'une usine de production de lait

Remarque

On s'intéresse à la ligne bouteille de l'usine et plus précisément aux éléments suivants: remplisseuse, capsuleuse, hydromat, étiqueteuse et emballeuse.

II.3.2.2 Présentation de la ligne bouteille

Ce système de production est une représentation simplifiée à des fins pédagogiques, d'un atelier de conditionnement de lait. Dans la catégorie d'ateliers concernée par cette thèse, les opérations ont des contraintes temporelles associées qui doivent être impérativement respectées [MHA, 10d]. La violation de ces contraintes peut mettre en cause la santé des clients.

Le système considéré est :

- un atelier avec postes d'assemblages,
- ordonnancé,
- à fonctionnement cyclique

Soit l'atelier de la figure II.8. Il est composé de :

- six machines M_1, M_2, M_3, M_4, M_5 et M_6,
- sept tapis roulants : T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6 et T_7.

Cet atelier est destiné à fabriquer du lait. La production envisagée est caractérisée par une seule gamme opératoire :

GO : Opération 1.1: M_1 ([5 u.t., 15u.t.]); Opération 1.2 :M_2 ([2 u.t., 20 u.t.]); Opération 1.3 : M_3 ([2 u.t., 12 u.t.]); Opération 1.4 : M_4 ([1480 u.t., 1650 u.t.]); Opération 1.5 : M_5 ([2 u.t., 20 u.t.]); Opération 1.6 : M_6 ([12 u.t., 20u.t.].

II.3.2.2.1 Contraintes temporelles associés à la laiterie

On s'intéresse aux ateliers manufacturiers à contraintes de temps de séjour en fonctionnement répétitif, où, à chaque opération est associé un intervalle de temps dont la borne inférieure désigne le temps minimum nécessaire à l'exécution de l'opération. Si le temps accordé à cette opération est inférieur à cette borne, cela signifie que l'opération n'a pas été achevée. La borne supérieure fixe le temps maximum à ne pas dépasser pour ne pas altérer la qualité des produits fabriqués [JER, 06f].

Dans la catégorie d'ateliers concernés, les opérations ont des contraintes temporelles associées qui doivent être impérativement respectées. La violation de ces contraintes peut mettre en cause la santé des personnes. Ainsi, la détection d'une violation des contraintes d'intervalles, associées aux différents états, doit automatiquement entraîner un arrêt de la production, ou tout du moins une élimination des produits dangereux et un retour à un état correct pour le système.

Les contraintes temporelles de l'atelier de production laitière sont associées aux :

– **Opérations de stérilisation** : la stérilisation consiste à chauffer le lait à une température de 115° C pendant une durée Δt afin d'éliminer les bactéries et les spores bactériennes. Les contraintes temporelles associées à l'opération de stérilisation d'une bouteille dans l'hydromat sont :

  - le temps de stérilisation

- la température de stérilisation

Deux cas peuvent être distingués :

En effet, une bouteille du lait laissé dans l'hydromat peut brûler (temps de séjour d'une bouteille dans l'hydromat est supérieur au temps requis à l'opération de stérilisation). De même si le lait est n'est pas assez stérilisé, les spores bactriennes ne sont pas assez éliminées. On peut conclure que dans les deux cas, toute violation des contraintes peut mettre en cause la santé des personnes.

- **Opérations de transfert remplisseuse/capsuleuse** : le lait cru contient généralement des spores bactériennes en nombre considérable, bien que faible par rapport à la numération bactérienne totale. Leur abondance dépend du degré de contamination des flacons mais aussi de l'opération de transfert remplisseuse/capsuleuse. En effet la contamination peut résulter par exemple des poussières, des impuretés et de l'exposition en plein air. On peut admettre qu'une violation de la contrainte associée à l'opération de transfert peut mettre en cause la santé des consommateurs. Rappelons simplement qu'un produit non conforme est absolument inutilisable dans les ateliers à contraintes de temps et que dans ce cas il faut absolument l'identifier et l'éliminer.

- **Opérations de bouchage :** au niveau de la capsuleuse, chaque bouteille embrasse une capsule. Une fois la capsule est pressée sur le flacon, elle est soudée par une tête de scellage. Si le temps accordé à l'opération de bouchage n'est pas suffisant (bouchon mal positionné), la qualité du lait est altéré (bouteille airée). Par conséquent le produit est non consommable.

II.3.2.2.2 Principe de fonctionnement

Les flacons (groupe de 6) sont transférés par le tapis roulant $\mathbf{T_1}$ pour alimenter la remplisseuse **(M_1),** figure II.8. Une fois les bouteilles remplies, elles sont transportées vers la capsuleuse **(M_2)** par un convoyeur $\mathbf{T_2}$. Durant leurs séjour le long de la vis sans fin, chaque bouteille embrasse une capsule pour être soulevée par une porte bouteille jusqu'à ce que la capsule soit pressée sur la bouteille ensuite soudée par une tête de scellage.

Après capsulage et impression des dates de péremption (machine $\mathbf{M_3}$), les bouteilles arrivent, une par une, vers l'Hydromat **(M_4)** par la voie du convoyeur $\mathbf{T_4}$. L'hydromat assure la stérilisation de 96 bouteilles à la fois. Après stérilisation les bouteilles (groupe de 6) seront transférés par l'intermédiaire du tapis $\mathbf{T_5}$ vers l'étiqueteuse **(M_5)**, les brosses chargées de mettre de la colle, et les rouleaux d'éponges, chargés de presser sur les étiquettes, assurent un positionnement précis de l'étiquette. Les récipients poursuivent leurs déplacement sur le convoyeur $\mathbf{T_6}$ de l'étiqueteuse jusqu'à l'entrée de l'emballeuse **(M_6)**.

Au niveau de l'emballeuse, les bouteilles seront regroupées en 6 et enveloppées par soudure sur deux films. L'emballage des 6 bouteilles est déposé sur le tapis $\mathbf{T_7}$ à destination du stock des produits finis **SA**. Il convient de noter que le transitoire de chargement de l'atelier n'est pas décrit dans ces lignes.

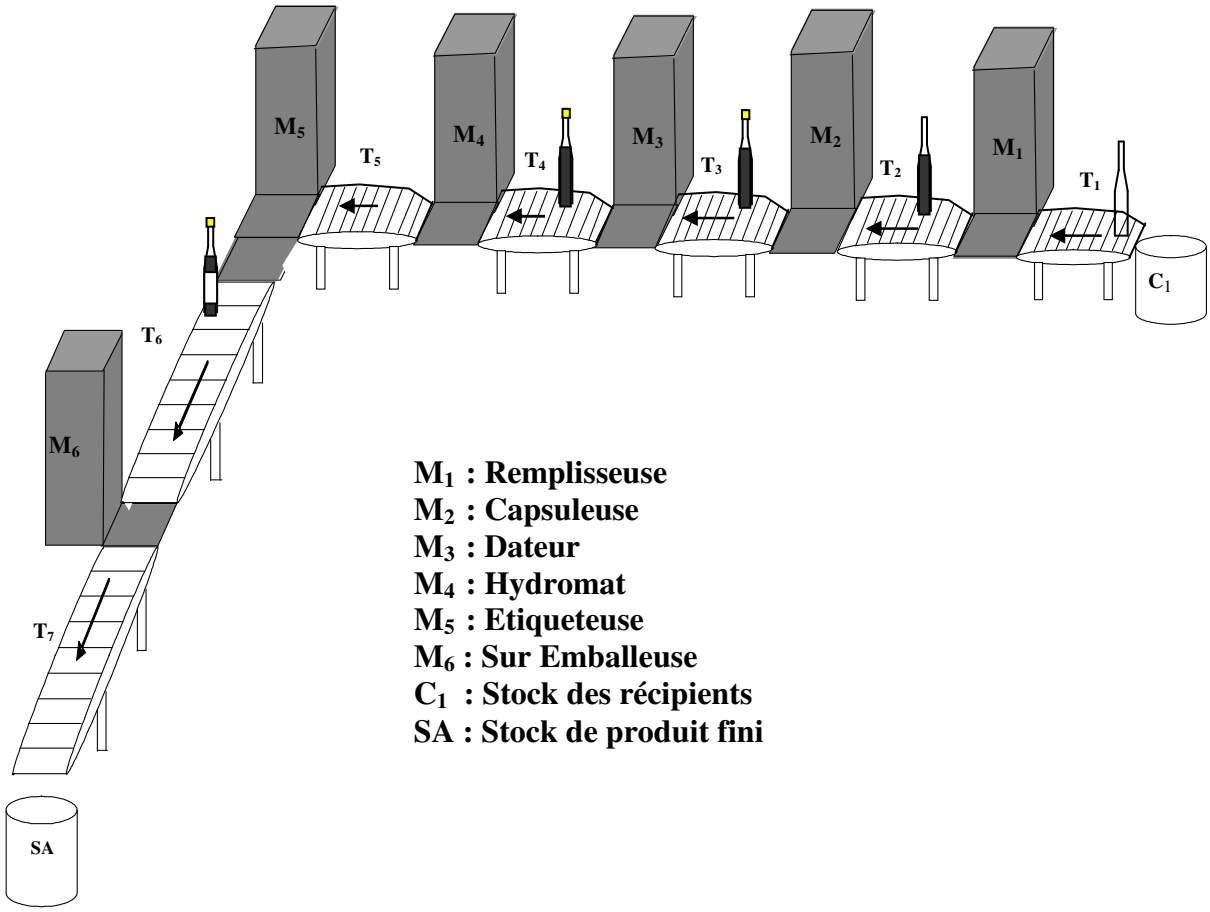


Figure II.8 : Atelier de production laitière

II.3.2.2.3 Modélisation de l'atelier de production laitière par un GEV P-temporel à arcs valués

La figure II.9, présente un GEV P-temporel modélisant l'atelier de production laitière (ligne bouteille).

Le tableau II.2, donne les intervalles (IS_i) et les temps de séjour prévus (q_{ie}) associés aux différentes places.

Tableau II.2 : Intervalles et temps de séjour prévus

IS_i	q_{ie}
IS_1=[1, +∞[	q_{1e}=22
IS_2=[30,45]	q_{2e}=35
IS_3=[5, 15]	q_{3e}=9
IS_4=[8, 65]	q_{4e}=30
IS_5=[2,20]	q_{5e}=11
IS_6=[11, 18]	q_{6e}=14
IS_7=[2, 12]	q_{7e}=10
IS_8=[10, 70]	q_{8e}=50
IS_9=[1480, 1650]	q_{9e}=1530
IS_{10}=[3, 70]	q_{10e}=50
IS_{11}=[2, 20]	q_{12e}=15
IS_{12}=[5, 70]	q_{13e}=35
IS_{13}=[12, 20]	q_{14e}=15
IS_{14}=[5, 15]	q_{15e}=10
IS_{15}= [1,+∝[	q_{15e}=99
IS_{16}=[1, +∞[	q_{16e}=7
IS_{17}=[1, +∞[	q_{17e}=8
IS_{18}=[1, +∞[	q_{18e}=630
IS_{19}=[1, +∞[	q_{19e}=3
IS_{20}=[1, +∞[	q_{14e}=10

Dans la suite de ce chapitre, les hypothéses suivantes sont adoptées :

- Hypothése 1: les GE considérés sont fortement connexes,
- Hypothése 2: les GE sont consistants et conservatifs.

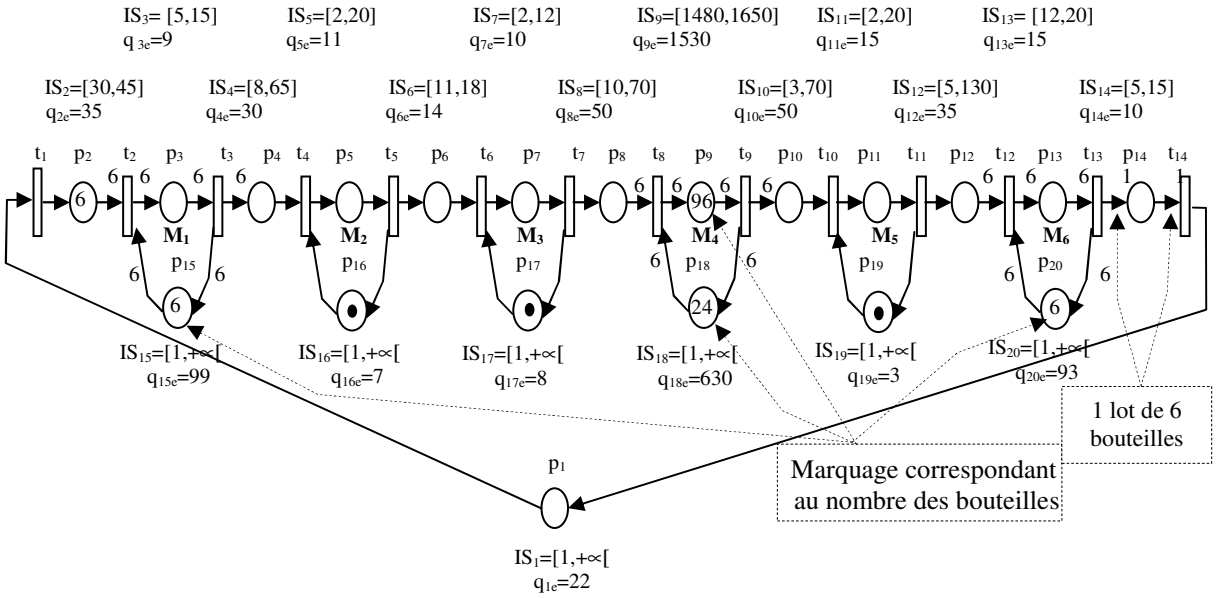


Figure II.9 : GEV P-temporel associé à la laitière

II.3.2.2.4 Transformation du GE à arc valués en un GE

Les systèmes de production à fonctionnement répétitif peuvent être modélisés par des GE qui sont une classe importante des RdP. Afin de réduire la taille du modèle, les structures de GEV (aussi appelés Weighted T-Systems par l'équipe de Silva [TRU, 92] ou GE généralisés [MUN, 93]) peuvent être utilisées. Ces structures permettent également de prendre en compte les opérations d'assemblage et de désassemblage de lots de composants dans le système.

Néanmoins, on dispose de peu de résultats concernant les GEV. Dans le cas discret Teruel et al. [TRU ,92] démontrent quelques propriétés structurelles et comportementales des GEV. Campos et al. [CAM, 91] définissent des bornes au temps de cycle moyen dans un GEV. Toursi et Sauer [TOU, 04] s'intéressent au problème d'optimisation des ressources dans les systèmes de production à fabrication répétitive en se basant sur les GEV; ce problème consiste à atteindre un temps de cycle donné en minimisant une somme pondérée des marquages des places.

Hamaci [HAM, 06] traite le problème d'analyse de performances des systèmes à événements discrets modélisables par des GEV; une méthode de linéarisation de ces graphes est proposée, dans le but d'obtenir des représentations linéaires dans l'algèbre (min; +). Les travaux de Marchetti [MAR, 09] s'intéressent à l'étude de la vivacité des GEV.

Le problème de transformation des GEV en GE est très peu abordé dans la littérature. Munier [MUN, 93] définit une méthode d'expansion permettant d'obtenir un GE équivalent au GEV initial et de calculer ainsi le temps de cycle du GEV à partir du GE équivalent. Nakamura et Silva [NAK, 99] proposent un algorithme de transformation du GEV en GE en adoptant les hypothèses d'un GE consistent et conservatif.

Dans cette partie, nous proposons une application d'une méthode de transformation du GEV, basée sur un algorithme proposé dans [NAK, 99], à un atelier de production laitière.

A/ Algorithme de transformation

Notations

$\hat{\Sigma} = (\hat{V}, \hat{E})$	:	GE obtenu à partir d'un GEV ($\Sigma = (V, E)$)
$\hat{E}$ ($\hat{E} := \bigcup_i E_v^i \cup E_h$)	:	ensemble fini des places de $\hat{\Sigma}$
$\hat{V}$ ($\hat{V} := \bigcup_i V^i$)	:	ensemble fini de transitions de $\hat{\Sigma}$
$\hat{m}_0$	:	marquage initiale du $\hat{\Sigma}$
$m_0(p)$	:	marquage initiale associé à une place p ($p \in P$)
$V^i := \{ t_i^a \mid a = 1, 2, \ldots, X(t_i) \}$	:	séquence de tir d'une transition t_i
$X(t_i)$	:	t-invariant associé à une transition t_i (exemple : $X(t_i)=3= \{ t_i^1, t_i^2, t_i^3 \}$)

$E_i^v := \{p_i^{-a} = (t_i^a, t_j^{a \bmod X(t_i)+1}) \mid a = 1, 2, ..., X(t_i)\}$: est un ensemble fini des places, reliant deux transitions appartenant au même circuit de commande (un circuit de commande est une séquence des tirs successifs d'une même transition),
tel que $p_i^{-a} = (t_i^a)^\circ$ et $p_i^{-a} = {}^\circ(t_j^{a \bmod X(t_i)+1})$

$E_h := E_h \cup \{p^{a:(b-1) \bmod X(t_j)+1)}\}$: est un ensemble fini des places connectant des transitions appartenant à deux circuits de commande

A-1/ Description de l'algorithme

Afin de transformer un GE valué en un GE, deux étapes sont requises [MHA, 10d]:

- A chaque transition t_i, est associé une séquence de tir $X(t_i)$ ($V^i := \{ t_i^a \mid a = 1, 2, \ldots, X(t_i)\}$). Chaque couple de transition (t_i^k, $t_j^{k \bmod X(t_i)+1}$) est connecté à une place p_i^{-k} ($E_i^v := \{p_i^{-a} = (t_i^a, t_j^{a \bmod X(t_i)+1}) \mid a = 1, 2, ..., X(t_i)\}$). Si $X(t_i) = a$, la place $p_i^{-X(t_i)}$ est marqué par un jeton ($\hat{m}_0(p_i^{-a}) := 1$). Ainsi, il existe $|T|$ circuits de commande (intra transition sequential systems) à marquages unité qui représente les séquences de tir successifs d'une transition t_i.

- A chaque place $p \in P$ ($p = t^o{}_i$ et $p = {}^o t_j$), si le nombre de marque dans la place p (obtenu à partir du $a^{éme}$ franchissement de la transition t_i) permet le $b^{éme}$ franchissement de la transition t_j, alors t_i^a et $t_j^{(b-1) \bmod X(t_j)+1}$ sont connectés par une place $p^{a:(b-1) \bmod X(t_j)+1}$ ($E_h := E_h \cup \{p^{a:(b-1) \bmod X(t_j)+1)}\}$), qui représente la place de sortie de t_i^a. Le marquage associé à cette place est $[\frac{b-1}{X(t_j)}]$ $\{ \hat{m}_0(p^{a:(b-1) \bmod (X(t_j)+1}) := [\frac{b-1}{X(t_j)}] \}$.

A-2/ Présentation de l'algorithme de Nakamura et Silva [NAK, 99]

Procedure System Transformation;
Begin

for each $t_i \in T$
begin
$\Sigma^i := ((V^i, E^i), m_0^i)$ tel que
$V^i := \{ t_i^a \mid a = 1, 2, \ldots, X(t_i) \}$;
$E_i^v := \{p_i^{-a} = (t_i^a, t_j^{a \bmod X(t_i)+1}) \mid a = 1, 2, ..., X(t_i)\}$;
If $a = X(t_i)$ **then** $\hat{m}_0(p_i^{-a}) := 1$
Else $\hat{m}_0(p_i^{-a}) := 0$;

End for; /* Construction de la structure correspondante à une séquences de tir d'une transition donnée (construction des circuits de commande) */

$E_h := \phi$;

for each p ∈ P
begin

t_i: = °p; /* $|°p| = 1$ * /

t_j: = p°; /* $|p°| = 1$ * /

a: =0 ;

Repeat

$$b := [\frac{m_0(p) + Post(p, t_i).a}{Pre(p, t_j)} + 1];\ a := [\frac{Pre(p, t_j).b - m_0(p)}{Post\ (p, t_i)}];$$

If $a \leq X(t_i)$ **then**
begin

$$E_h := E_h \cup \left\{ p^{a:(b-1)\ mod X(t_j)+1)} \right\};$$

$$\hat{m}_0(p^{a:(b-1)\ mod(X(t_j)+1}) := [\frac{b-1}{X(t_j)}];$$

End if

Until $a \geq X(t_j)$;

End for; /* places et arcs connectant des transitions appartenant à deux circuits de commande */

$\hat{V} := \bigcup_i V^i$; $\hat{E} := \bigcup_i E_v^i \cup E_h$;

End.

B/ Exemple d'application

Soit un GEV, figure II.10, le marquage initial associé à ce graphe est $m_0 = (0, 0, 4)^T$.

Ce graphe est consistant puisque il possède un t-invariant X couvrant toutes les transitions du réseau ($X(t_i) = (X(t_1), X(t_2), X(t_3)) = (2, 5, 3)$).

La figure II.11, présente un graphe d'événement, obtenu en appliquant l'algorithme présenté dans [NAK, 99].

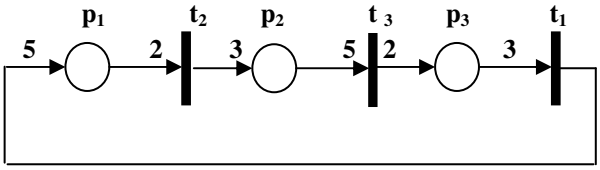
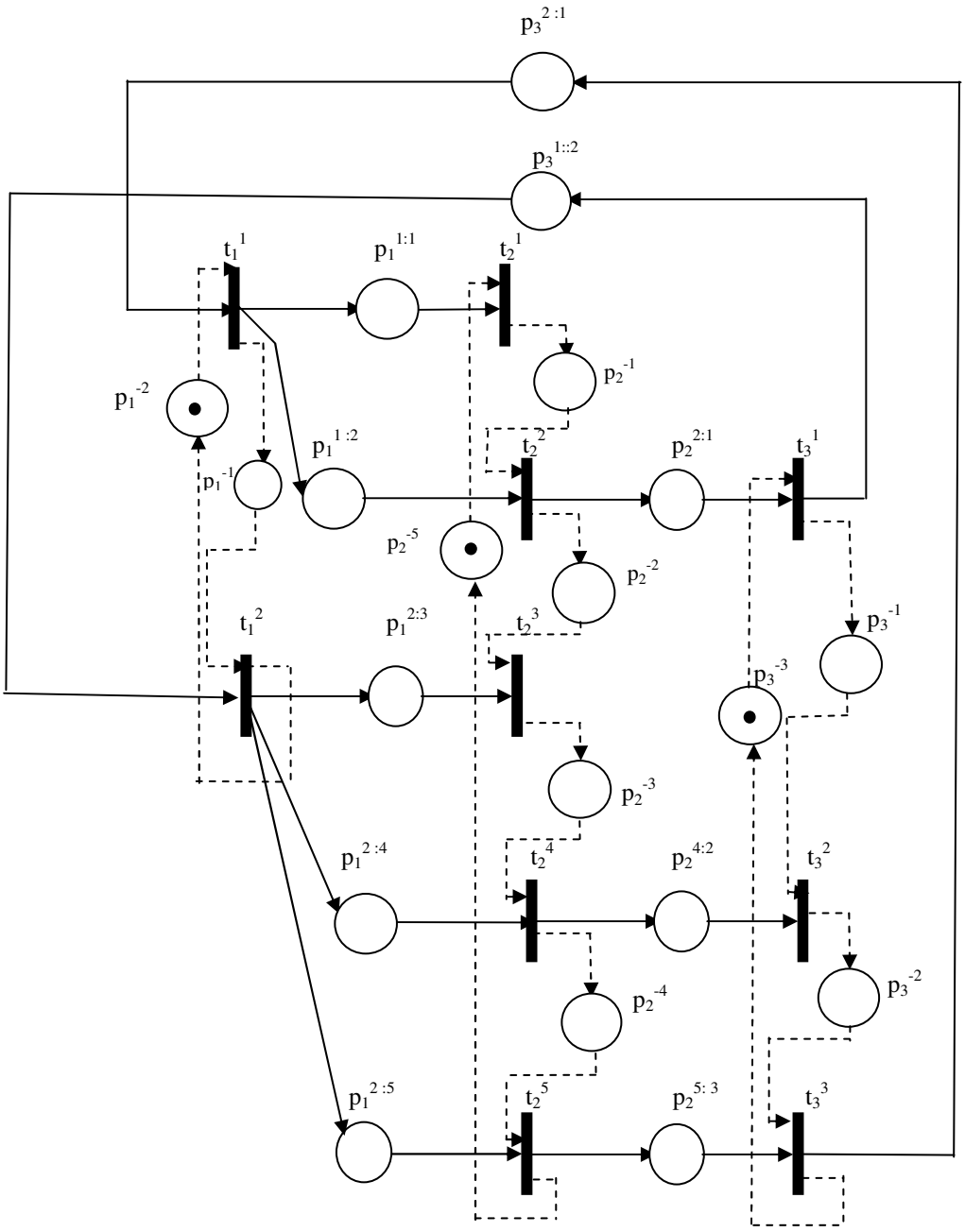


Figure II.10: Exemple d'un GEV ($m_0 = (0, 0, 4)^T$)



--- : Circuit représentant une séquence de tirs successifs d'une transition t_i (circuit de commande).

— : Circuit connectant des transitions qui n'appartiennent pas au même circuit de commande.

Figure II.11 : GE obtenu après transformation

- En se basant sur les marquages correspondant au GE obtenu, on peut conclure, au vue du graphe de couverture, que le système possède un t-invariant et qu'il est réinitialisable.

- Le t-invariant (2, 5, 3) du graphe de départ devient :[(1, 1), (1, 1, 1, 1, 1), (1, 1)] ou les colonnes du vecteur correspondantes sont :[(t_1^1, t_1^2), (t_2^1, t_2^2, t_2^3, t_2^4, t_2^5), (t_3^1, t_3^2, t_3^3)]. Les mêmes résultats peuvent être retrouvés en effectuant le calcul des t-invariants sur

la matrice d'adjacence du graphe transformé. Le GE après transformation est donc consistant.

$$m_0 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 4 \end{Bmatrix} \xrightarrow{t_1^1} m_1 = \begin{Bmatrix} 5 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \xrightarrow{t_2^1} m_2 = \begin{Bmatrix} 3 \\ 3 \\ 1 \end{Bmatrix}$$

$$m_1 \xrightarrow{t_2^2} m_3 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 6 \\ 1 \end{Bmatrix} \xrightarrow{t_3^1} m_4 = \begin{Bmatrix} 1 \\ 1 \\ 3 \end{Bmatrix} \xrightarrow{t_1^2} m_5 = \begin{Bmatrix} 6 \\ 1 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

$$\xrightarrow{t_2^3} m_6 = \begin{Bmatrix} 4 \\ 4 \\ 0 \end{Bmatrix} \xrightarrow{t_2^4} m_7 = \begin{Bmatrix} 2 \\ 7 \\ 0 \end{Bmatrix} \xrightarrow{t_2^5} m_8 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 10 \\ 0 \end{Bmatrix} \xrightarrow{t_3^2} m_9 = \begin{Bmatrix} 0 \\ 5 \\ 2 \end{Bmatrix} \xrightarrow{t_3^3} m_0$$

– En conclusion, le GE obtenu est conservatif. Il faut voir là une illustration du fait que les possibilités d'interprétations physiques ont été conservées lors de la transformation.

Remarque : L'algorithme de Nakamura ne respecte que le langage associé au RdP et s'autorise la suppression de places qu'il juge inutiles. Cette optimisation ne sera pas appliquée dans la mise en œuvre qui va suivre. A l'inverse, on vérifiera systématiquement que les marquages intermédiaires sont conservés.

C/ Application de l'algorithme de transformation à un atelier de production laitière

Dans cette section, une application de l'algorithme de transformation présenté dans Nakamura et Silva est proposée. Prenons l'exemple d'un poste d'assemblage constitué d'un hydromat (M_4) et d'une étiqueteuse (M_5). A la sortie de l' hydromat, les bouteilles (groupe de 6) seront transférées une par une vers l'étiqueteuse par l'intermédiaire du tapis roulant T_6 [MHA, 10d]. La figure II.12, présente un exemple d'application du l'algorithme de transformation à un poste d'assemblage (Hydromat + Etiqueteuse). Le t-invariant du graphe est (6, 1, 1, 6, 6,1) associé respectivement aux transitons t_{10}, t_{11} et t_{12}.

A la transition t_{10} (resp. t_{11}), est associé une séquence de tir $X(t_{10}) = :\{ t_{10}^a \mid a=1, 2, \ldots, 6\}$(pour notre exemple $t_{10}^1 = t_{101}, t_{10}^2 = t_{102}, \ldots, t_{10}^6 = t_{106}$). A Chaque couple de transition (t_{10}^k, t_{10}^{k+1}) est associé une place p_i^{-k} (p_i^{-k} =p_{301} place reliant les transitions t_{101} et t_{102}). Si X (t_{10})=6, la place p_{306} est marqué par un jeton ($\hat{m}_0(p_{306}) := 1$). Le graphe, figure II.12, contient deux circuits de commande (circuit en bleu) à marquages uniques ($|T|$=2), représentant les séquences de tirs des transitions t_{10} et t_{11}.

Les transitions t_{101}(X (t_{10})=1) et t_{111}(X (t_{11})=1) sont connectés par une place p_{111}[($p_{111} \in P$) et (p_{111}= t^o_{101}, p_{111}= $^o t_{111}$)]. Cette place connecte deux transitions appartenant a deux circuits de commande différents et elle est notée $p^{a:(b-1) \bmod X(tj)+1}$ dans l'algorithme de transformation.

D/ Discussion

Dans la section précédente, on a directement appliqué l'algorithme proposé dans [NAK, 99]. Cependant, une analyse plus approfondie révèle que cela nous amène à construire un modèle équivalent d'une dimension inutilement élevée. De fait, les places représentées en bleu sur la figure II.12 ont été introduites pour représenter la séquence des mises à feu successives sur une même transition. Ces places représentent donc une contrainte de précédence. Or, il est trivial de dire le prédicat suivant :

((le premier tir de la transition t_{11} a eu lieu après le premier tir de la transition t_{10}) et (le deuxième tir de la transition t_{10} intervient après le premier tir de la transition t_{11})), implique directement que le premier tir de t_{10} intervient après le deuxième.

Il est certes indispensable de modéliser cette contrainte qui est incluse dans le GEV et qui doit demeurer dans le GE obtenu après transformation [MHA, 10d]. On a cependant prouvé que cette contrainte était naturellement induite. De ce fait, les places en bleu n'ont aucune utilité dans le GE obtenu : on les supprime pour simplifier la modèle, figure II.13.

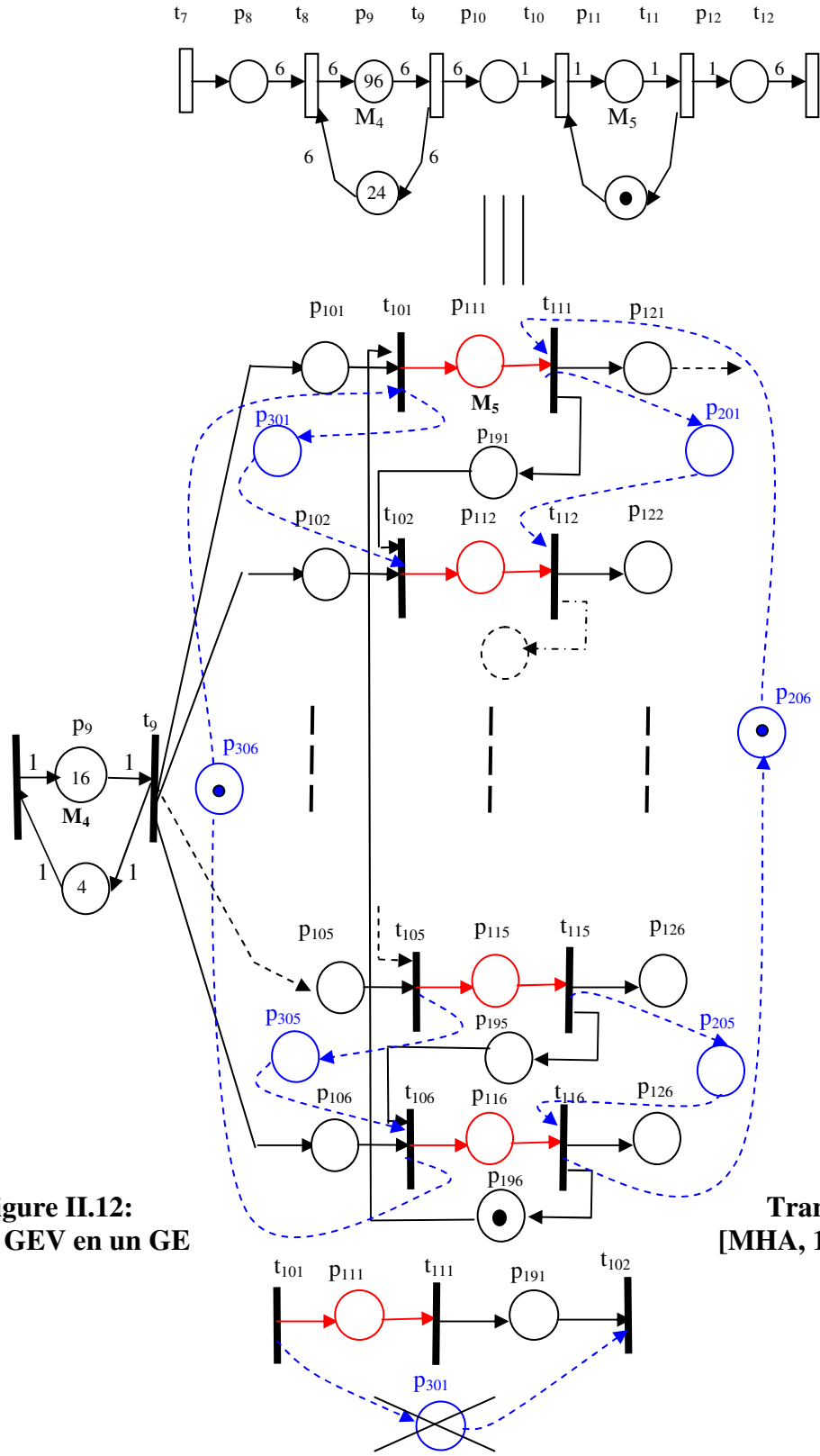


Figure II.12: Transformation d'un GEV en un GE [MHA, 10d]

Figure II.13 : Simplification systématique du modèle d'une machine [MHA, 10d]

E/ Modélisation de la laiterie par un RdP P-temporel

Dans le cas de notre atelier, l'étiqueteuse M_5 traite les bouteilles une par une ; l'étiquetage d'une bouteille i, ne peut pas débuter si et seulement si l'opération d'étiquetage de la bouteille (i −1) est élaboré. Au niveau du modèle, figure II.14, cela se traduit par une séquence de tir S = (t_{101}, t_{111}, t_{102}) ; la transition t_{102} ne peut être tirée qu'après le franchissement des transitions t_{101} et t_{111}. L'application de l'algorithme de Nakamura, aux différents postes d'assemblage de l'atelier permet d'obtenir un RdP P-temporel de la laiterie, figure II.15 [MHA, 10d].

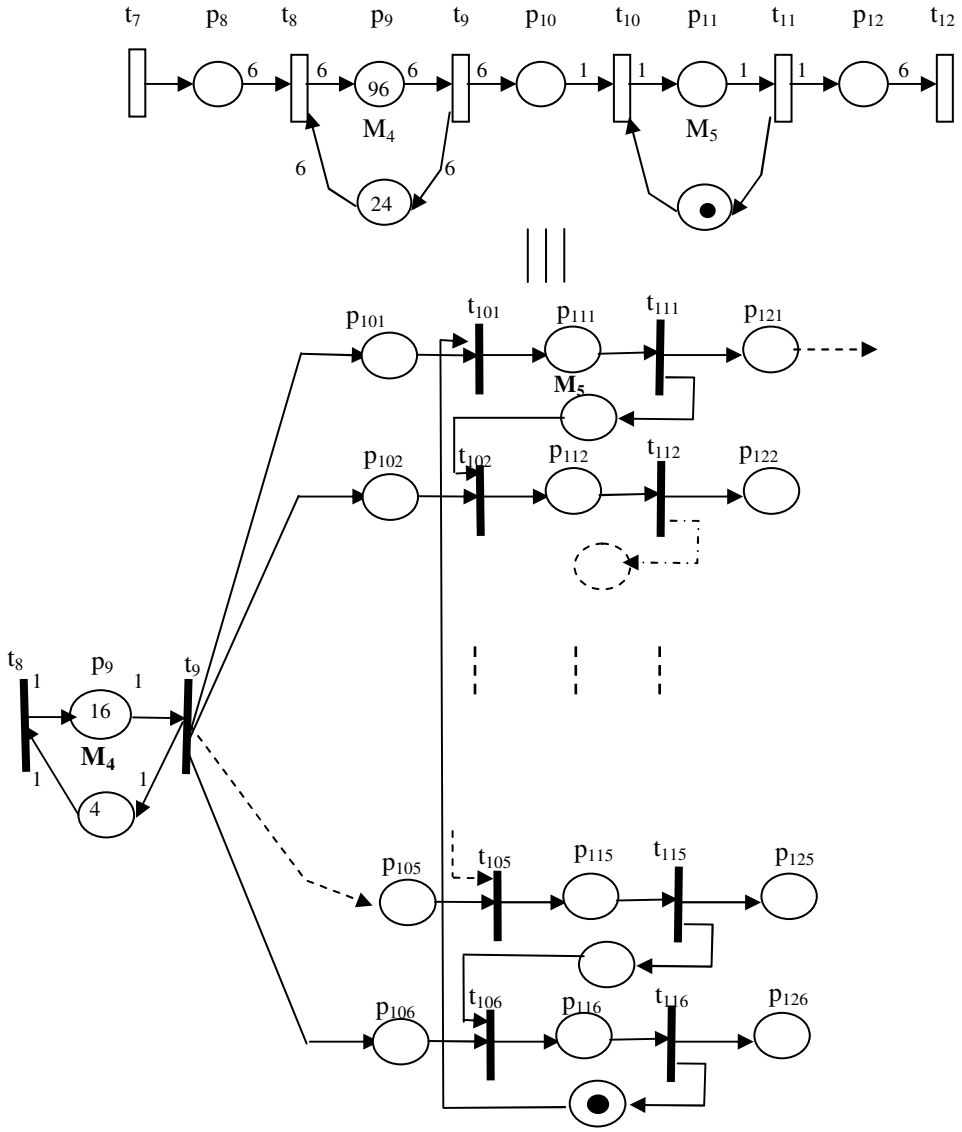


Figure II.14: GE après simplification systématique du modèle d'une machine [MHA, 10d]

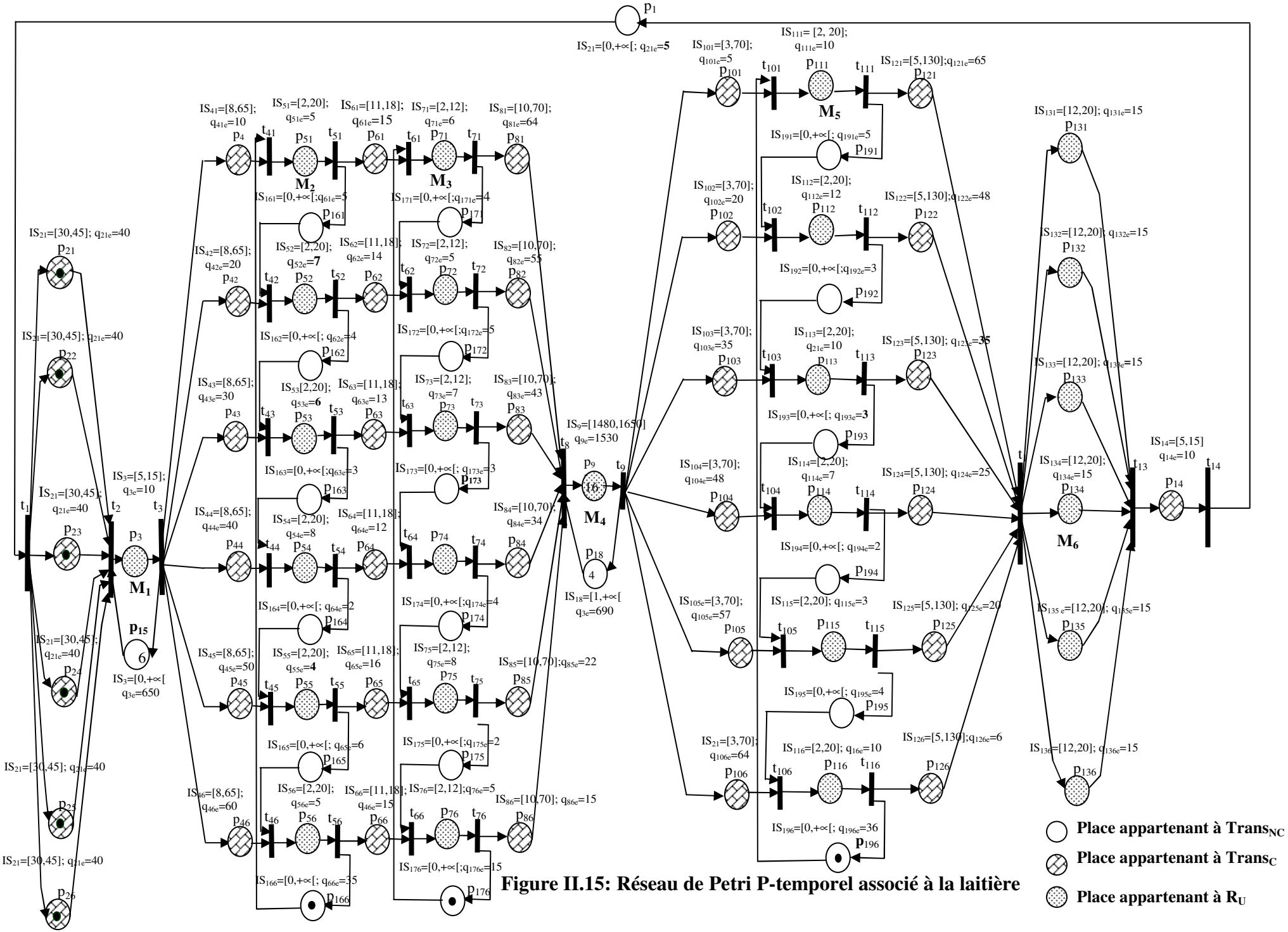


Figure II.15: Réseau de Petri P-temporel associé à la laitière

II.4 Conclusion

Le présent chapitre introduit deux applications de modélisation par RdP P-temporels des ateliers à contraintes de temps de séjour.

La première partie de ce chapitre a été dédiée aux RdP t-temporels, RdP P -temporels et RdP P-temporels commandés qui fournissent un outil orienté commande efficace pour l'intégration des contraintes de temps de séjour dans la structure du modèle. Les définitions et les propriétés fondamentales des RdP autonomes utiles pour la modélisation et l'analyse des systèmes en fonctionnement répétitif ont été rappelées.

L'étude menée dans le cadre de cette thèse se restreint à la production en très grande série où le fonctionnement est considéré comme répétitif. Deux types d'ateliers sont présentés :

- atelier sans postes d'assemblage à plusieurs gammes de production (Modèle d'Hillion),
- atelier avec postes d'assemblage à une gamme de production (Laitière).

Nous avons présenté dans ce chapitre, une application d'une méthode de transformation des GEV, utilisant un algorithme proposé par Nakamura et Silva, à un atelier de production laitière. Cette transformation permet d'obtenir un GE 1-valué pour lesquels il existe une littérature scientifique importante. On soulignera par ailleurs que GE produit est consistant et conservatif.

De manière intuitive, l'algorithme de transformation permet de conserver les interprétations physiques lors de la transformation.

La validation de l'algorithme de transformation, sur un atelier industriel de taille respectable effectuée dans ce chapitre, prouve l'efficacité industrielle de l'approche de Nakamura. D'un point de vue applicatif, les GEV modélisent bien souvent un mécanisme de synchronisation entre deux entités de même nature. Or, ces contraintes de synchronisations sont le point critique où l'on trouve des violations temporelles du cahier des charges pour les ateliers à contraintes de temps de séjour. On soulignera alors la pertinence industrielle de l'étude présentée dans ces lignes.

La contribution de cette thèse est d'étudier la robustesse des ateliers manufacturiers à contraintes de temps en s'appuyant sur les approches de l'état de l'art [HIL, 89], [JER, 06f]. Elle cherche notamment à étendre les résultats associés à un atelier sans postes d'assemblage à une application industriel (laitière) qui en comporte.

Pour l'heure, le chapitre suivant s'appuie sur l'étude de la robustesse des deux ateliers à contraintes de temps de séjour présentés dans ce chapitre pour en illustrer les différents aspects.

CHAPITRE III :

Commande Robuste des Systèmes Manufacturiers à Contraintes de Temps

Chapitre III

Commande Robuste des Systèmes Manufacturiers à Contraintes de Temps

III.1 Introduction

Les ateliers manufacturiers, les réseaux de transports ferroviaires ou routiers et les réseaux informatiques peuvent être considérés comme des SED. Cependant, la nature discrète des flux qui circulent n'exclue pas l'existence d'horaires à respecter, de dates de livraisons, de dates de péremptions etc. L'ensemble de ces contraintes temporelles se représente généralement par des contraintes de temps minimum et maximum affectées à une opération ou un état. Si l'affectation d'un temps minimum est assez répandue, par exemple le temps d'un trajet effectué à vitesse maximale, l'existence d'un temps maximum de séjour dans un état est plus subtile.

En effet, si on intègre qu'un produit laissé dans un four peut brûler, qu'une pièce oubliée dans un bain d'acide sera dégradée, qu'un projet arrivant après la clôture d'un appel d'offre sera éliminé, alors le démarrage d'une activité dès que cela est possible (fonctionnement « au plus tôt ») ne conduit généralement pas à une solution valide.

L'étude menée dans le cadre de cette thèse se restreint à la production en très grande série où le fonctionnement peut être considéré comme répétitif.

Après la modélisation des deux ateliers étudiés par des RdP P-temporels (chapitre II), une étude de la robustesse est ensuite abordée. D'abord, sans tenir compte de la dynamique du procédé, puis en fonction de l'état du système.

Dans ce contexte, les travaux présentés s'attachent à construire des approches de commande robuste. Notre contribution est la caractérisation analytique de la capacité à rejeter des perturbations temporelles en utilisant une couche de commande exploitant les degrés de liberté du système. Trois approches de commande robuste face aux perturbations seront présentées. La première est proposée par Jerbi [JER, 09a], la deuxième et la troisième constituent notre contribution. Une étude de l'efficacité des ces approches est réalisée.

La robustesse passive caractérise la faculté du système à maintenir les qualités spécifiées pour les sorties sans qu'aucune nouvelle action spécifique ne soit mise en œuvre. Une caractérisation analytique de cette propriété a tout d'abord été établie localement, puis, un algorithme de calcul de la marge de robustesse passive en un nœud est proposé.

III.2 Décomposition orientée synchronisation

Cette section présente une décomposition pour l'étude de la robustesse des ateliers à contraintes de temps de séjour. Cette décomposition formelle doit être effectuée afin d'aborder le calcul de la robustesse pour les deux topologies d'ateliers considérées.

Définition III.1

Un chemin dans un RdP est un sous-ensemble ordonné et orienté d'éléments connexes de $T \cup P$, tel que :

$$\begin{cases} Succ(t \in T) = p \in P \\ Succ(p \in P) = t \in T \end{cases}$$

où Succ(N) désigne le successeur de N dans le chemin.

Définition III.2

Un sous chemin monosynchronisé Lp_k est un chemin contenant une et une seule transition de synchronisation qui est son dernier élément [JER, 06b].

Définition III.3

Un sous chemin monosynchronisé élémentaire est un sous chemin monosynchronisé commençant par une place p tel que ^{o}p est une transition de synchronisation [JER, 06b].

Remarques

- Le dernier sous chemin monosynchronisé Lp_{kd} est constitué par la différence ensembliste entre le chemin global Lp et les sous chemins élémentaires monosynchronisés : $Lp_{kd} = Lp \backslash (\cup Lp_k)$.
  Par définition les sous chemins monosynchronisés constituent une partition de Lp : $Lp=(\cup Lp_k) \cup Lp_{kd}$.

- Dans le cas où le RdP G est un circuit, $G=Lp_{kd}$ constitue le seul chemin monosynchronisé.

Exemple III.1

Reprenons l'exemple du RdP P-temporel ordonnancé modélisant l'atelier multi produits présenté dans le chapitre II (Figure II.5). Rappelons que ce graphe est donné par la couche d'ordonnancement/planification.

Le tableau III.1, donne les sous chemins monosynchronisés élémentaires associé à un atelier multi-produits.

Tableau III.1 : Sous chemins monosynchronisés élémentaires

Sous chemin monosynchronisé élémentaire
$Lp_1=(p_{13}, t_9, p_{14}, t_{10}, p_{15}, t_{11}, p_{16}, t_{12}, p_{10}, t_6)$
$Lp_2=(p_{13}, t_9, p_9, t_1)$
$Lp_3=(p_2, t_2, p_3, t_3)$
$Lp_4=(p_2, t_2, p_8, t_8)$
$Lp_5=(p_4, t_4, p_5, t_5, p_1, t_1)$
$Lp_6=(p_4, t_4, p_6, t_6)$
$Lp_7=(p_{11}, t_7, p_7, t_3)$
$Lp_8=(p_{11}, t_7, p_{12}, t_8)$

Notations

- C_{ms} est l'ensemble des sous chemins monosynchronisés.
- C_{se} est l'ensemble des sous chemins monosynchronisés élémentaires.
- IN(Lp) est le nœud d'entrée du chemin Lp.
- OUT(Lp) est le nœud de sortie du chemin Lp.
- T_S est l'ensemble des transitions de synchronisation.
- T_P est l'ensemble des transitions de parallélisme.

La figure III.1 montre un sous chemin monosynchronisé élémentaire $Lp_5= (p_4, t_4, p_5, t_5, p_1, t_1)$ et différentes notations utilisées.

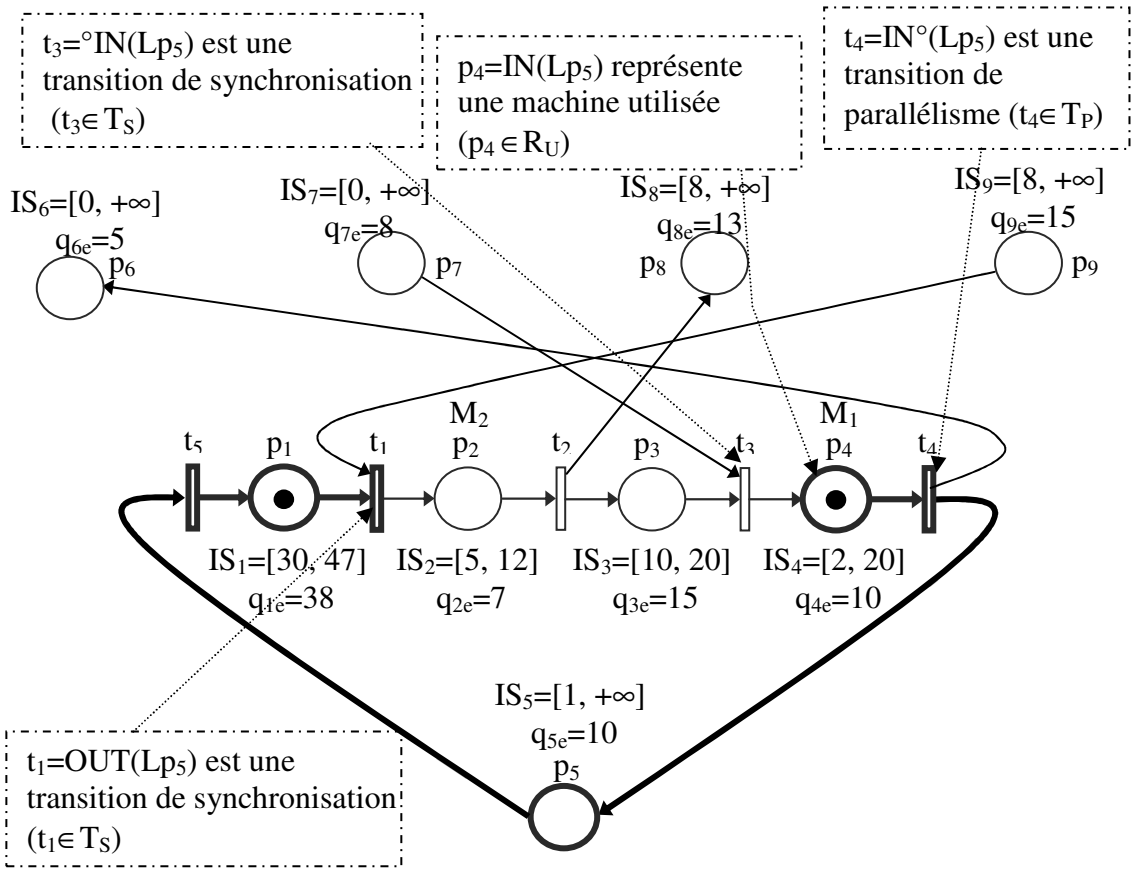


Figure III.1 : Un sous chemin monosynchronisé élémentaire $Lp_5=(p_4, t_4, p_5, t_5, p_1, t_1)$ et différentes notations

III.3 Etude de robustesse des ateliers manufacturiers

III.3.1 Définitions

Définition III.4

Une perturbation est définie [BAI, 94], d'une manière générale, comme tout événement opérationnel non prévu pouvant affecter les performances d'un ordonnancement généré, dans un environnement statique où toutes les données du problème sont connues à l'avance et aucun changement dans l'environnement n'est envisagé. La perturbation intervient lors de la mise en œuvre de ce dernier.

Définition III.5

Les perturbations peuvent être internes ou externes au système de production [BAI, 94]:

- Les perturbations internes sont des événements opérationnels imprévus qui se produisent au sein du système de production, par exemple, un prolongement de la durée d'une ou plusieurs tâches, ou une panne machine, ou une absence inopinée d'un opérateur ou, une erreur d'information, etc.

- Les perturbations externes sont des évènements affectant les entrées et les sorties du système de production. On distingue alors les perturbations dues aux fournisseurs, comme la variation des dates de disponibilité de la matière première, et des perturbations dues aux clients qui passent et modifient fréquemment leurs commandes, au dernier moment, au détriment de celles planifiées depuis longtemps.

Définition III.6

La robustesse d'un système est définie comme sa capacité à conserver les propriétés spécifiées en présence de variations ou d'incertitudes prévues ou imprévues [COR, 96].

Selon la nature de la réaction face à une perturbation, la robustesse peut être aussi décomposée en deux types : robustesse passive ou robustesse active.

Définition III.7

La robustesse passive [COL, 97], correspond au cas où aucun changement dans la conduite n'est nécessaire pour que les propriétés spécifiées par le cahier des charges soient conservées en présence de variations.

Définition III.8

La robustesse active correspond au cas où les propriétés spécifiées peuvent être maintenues, mais au prix d'un calcul total ou partiel de la conduite [COL, 03].

Considérons un SED, soit G le modèle RdP P-temporel associé. Appelons B(G) le comportement de G correspondant à la trajectoire des états successivement atteints.

Notons C(B(G)) le cahier des charges établi sur le comportement du système B(G). Ce cahier des charges se matérialise par une série de contraintes que doit vérifier B(G). Le non respect de C(B(G)) correspond à une violation du cahier des charges.

Définition III.9

Un sous-ensemble SG de G est robuste à une perturbation δ si et seulement si $\forall$ m$\in$ SG, l'occurrence de la perturbation δ au nœud m n'entraîne pas une violation de C (B(G)) [JER, 04].

Définition III.10

Un SED est robuste en un nœud n à une perturbation δ si l'occurrence de δ au nœud n n'entraîne pas une violation de C(B(G)) [JER, 04].

.

Définition III.11

Un chemin Lp$\in$G possède une robustesse sur [δ_{min}, δ_{max}] si l'occurrence d'une perturbation $\delta\in$[δ_{min}, δ_{max}], soit à l'entrée soit en un nœud quelconque de ce chemin, ne provoque pas une violation de C(B(G)) [JER, 04].

Définition III.12

L'intervalle de capacité de rejet temporel passif d'un chemin Lp est RC(Lp)=[Ca(Lp), Cr(Lp)] [JER, 05] :

$$Ca(Lp) = \sum_{p_i \in Lp \cap (R_N \cup Trans_{NC})} (q_{ie} - b_i), \qquad \text{III.1}$$

$$Cr(Lp) = \sum_{p_i \in Lp \cap (R_N \cup Trans_{NC})} (q_{ie} - a_i). \qquad \text{III.2}$$

Ca(Lp) (respectivement Cr(Lp)) est la capacité de rejet temporel passif à une avance (respectivement à un retard).

Définition III.13

La marge disponible de commande à l'avance, f_a (p_i), et la marge disponible de commande au retard, f_r (p_i), associées à la place p_i sont définies par [JER, 09b] :

:

$$f_a : P \rightarrow Q^-$$

$$p_i \mapsto f_a(p_i) = \begin{cases} a_i - q_{ie} \text{ si } q_i \leq a_i \\ q_i - q_{ie} \text{ si } a_i < q_i < q_{ie} \\ 0 \text{ si } q_{ie} \leq q_i \leq b_i \end{cases}$$

$$f_r : P \rightarrow Q^+ \cup \{+\infty\}$$

$$p_i \mapsto f_r(p_i) = \begin{cases} b_i - q_{ie} \text{ si } q_i \leq q_{ie} \\ b_i - q_i \text{ si } q_{ie} < q_i \leq b_i \end{cases}$$

Définition III.14

Une transition t constitue un sous chemin élémentaire localement commandable sur la plage $[\max(f_a(p_i)), \min(f_r(p_i))]$ si t est commandable ($t \in T_C$) [JER, 06f].
$p^o_i = t$ $p^o_i = t$

Définition III.15

Un chemin Lp est localement commandable sur la plage $[\Delta_{min}, \Delta_{max}]$ si on peut générer par la commande, en agissant sur $T_C \cap Lp$, une variation $\delta \in [\Delta_{min}, \Delta_{max}]$ sur son dernier nœud sans occasionner de mort de marques au niveau de ses transitions de synchronisation [JER, 06a].

Définition III.16

Un chemin Lp est commandable sur la plage $[\Delta_{min}, \Delta_{max}]$ si on peut générer par la commande une variation $\delta \in [\Delta_{min}, \Delta_{max}]$ sur son dernier nœud sans occasionner de violation de contraintes du cahier des charges.

Exemple III.2

Considérons la transition t_4 de la figure III.2 et supposons qu'elle est commandable ($t_4 \in T_C$).

Les marges de commande disponibles sont respectivement : $f_a(p_4) = -8$ et $f_r(p_4) = 10$. Nous concluons que la transition t_4 constitue un sous chemin élémentaire localement commandable sur la plage [−8, 10]. C'est-à-dire qu'un décalage temporel appartenant à [−8, 10] peut être introduit sur le franchissement de t_4.

$IS_4 = [2, 20]$, $q_{4e} = 10$

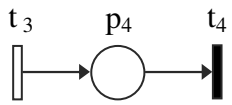


Figure III.2 : La transition t_4 est un sous chemin élémentaire localement commandable sur [−8, 10]

Exemple III.3

Considérons la transition t_6 de la figure III.3 et supposons qu'elle est commandable ($t_6 \in T_C$). La transition t_6 est une transition de synchronisation ($t_6 \in T_S$).

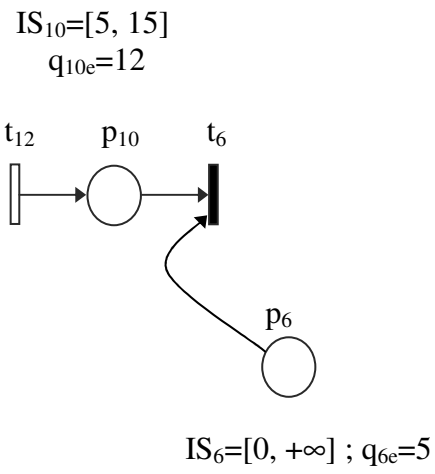


Figure III.3 : Cas d'une transition de synchronisation commandable

Il vient :

$$p^\circ_{10}=t_6 \Rightarrow f_a(p_{10})=5-12=-7 \text{ et } f_r(p_{10})=15-12=3$$
$$p^\circ_{6}=t_6 \Rightarrow f_a(p_{6})=0-5=-5 \text{ et } f_r(p_{6})=+\infty$$

$$\Delta_{min} = \max_{p_i^\circ = t_6}(f_a(p_i)) = \max(-7,-5) = -5$$
$$\Delta_{max} = \min_{p_i^\circ = t_6}(f_r(p_i)) = \min(3,+\infty) = 3$$

La transition t_6 constitue alors un sous chemin élémentaire localement commandable sur [−5, 3].

III.3.2 Robustesse Passive

Dans cette partie, nous présentons des résultats concernant la robustesse passive. Une méthode de calcul d'une borne supérieure de la robustesse en un nœud est proposée. Cette approche cherche à agréger les différentes informations de robustesse locale de tous les chemins du graphe.

III.3.2.1 Calcul des marges de la robustesse passive locale

Dans la suite, nous donnons les formules analytiques de calcul des marges de robustesse passive locale à l'entrée d'un sous chemin monosynchronisé [JER, 06f].

Notations

- δr_{Lpk} (respectivement δa_{Lpk}) : retard (respectivement avance) acceptable à l'entrée du sous chemin monosynchronisé Lp_k,

- Δrc_k (respectivement Δac_k) : marge de retard (respectivement d'avance) compensable sur le sous chemin monosynchronisé Lp_k,
- Δrt_k (respectivement Δat_k) : marge de retard (respectivement d'avance) transmissible sur le sous chemin monosynchronisé Lp_k,
- p_z : la dernière place du chemin Lp_k,
- $S°p_{ze}(n)$: le $n^{ème}$ instant de tir prévu de la transition d'entrée de la place p_z,
- $S°p_z(n)$: le $n^{ème}$ instant de tir effectif de la transition d'entrée de la place p_z.

♦ ***Cas d'une avance*** **[JER, 06f]**

$$\delta a_{Lpk} = \Delta ac_k + \Delta at_k$$

avec :

$$\Delta ac_k = \sum_{p_i \in Lp_k \cap (R_N \cup Trans_{NC})} (q_{ie} - b_i) + [(q_{ze} - b_z) \text{ si } p_z \notin R_N]$$

$$\Delta at_k = \max_{\substack{p_i^o = OUT(Lp_k) \\ p_i \notin Lp_k \\ p_i \in R_N}} (a_i - q_{ie})$$

D'après la topologie des ateliers considérés, la place p_z vérifie : $p_z \in R_N$ ou $p_z \notin R_N$ ($p_z \in Trans_C$).

Dans le cas où $p_z \in R_N$, nous sommes en présence d'une place représentant une machine en attente. Une avance égale à $-\infty$ peut être alors admise. Cette avance ne change pas l'instant de tir de la transition $OUT(Lp_k)$. Elle est alors complètement compensée ($\Delta ac_k = -\infty$) et par la suite $\delta a_{Lpk} = -\infty$.

Dans le cas où $p_z \notin R_N$, la place vérifiant [$p_i° = OUT(Lp_k)$ et $p_i \notin Lp_k$] serait une place appartenant à R_N. Le jeton dans cette dernière est disponible dès que le temps de séjour est égale à a_i, vu qu'elle représente une machine en attente. La marge ($a_i - q_{ie}$) contribue à la marge transmissible (Δat_k).

Pour ne pas avoir de mort de marque en p_z, le jeton arrivant en avance doit séjourner dans p_z au maximum $q_z=b_z$. La marge $(q_{ze} - b_z)$ disponible en p_z contribue à la marge compensable (l'avance est compensée par le retard $(q_{ze} - b_z)$).

- ***Cas d'un retard*** **[JER, 06f]**

$$\delta r_{Lpk} = \Delta rc_k + \Delta rt_k$$

avec :

$$\Delta rc_k = \sum_{p_i \in Lp_k \cap (R_N \cup Trans_{NC})} (q_{ie} - a_i) \qquad \text{III.3}$$

$$\Delta rt_k = \min_{\substack{p_i^o = OUT(Lp_k) \\ p_i \notin Lp_k}} (b_i - q_{ie}) \qquad \text{III.4}$$

Le raisonnement est le même pour le retard mais la possibilité de mort de marque est dans la place p_i.

Dans le cas où $p_z \notin R_N$, la place p_i serait une place appartenant à R_N. Le jeton dans cette dernière peut attendre indéfiniment puisqu'elle représente une machine en attente. Ce qui se traduit par : $\delta r_{Lpk} = +\infty$.

Dans le cas où $p_z \in R_N$, la marge compensable serait égale à $(q_{ze} - a_z)$. En effet, la machine est disponible dès que le temps de séjour du jeton dans la place p_z est égal à a_z.

Dans la place p_i, il est admis un maximum de retard égal à $(b_i - q_{ie})$.

Le tableau III.2 donne les marges de robustesse passive locale à l'entrée des huit sous chemins monosynchronisés élémentaires associés à un atelier multi-produits (figure II.5).

Tableau III.2 : Marges de robustesse passive locale

Sous chemin monosynchronisé élémentaire	Δrc_k	Δrt_k	δr_{Lpk}	Δac_k	Δat_k	δa_{Lpk}
$Lp_1=(p_{13}, t_9, p_{14}, t_{10}, p_{15}, t_{11}, p_{16}, t_{12}, p_{10}, t_6)$	8	$+\infty$	$+\infty$	$-\infty$	-8	$-\infty$
$Lp_2=(p_{13}, t_9, p_9, t_1)$	7	9	16	$-\infty$	0	$-\infty$
$Lp_3=(p_2, t_2, p_3, t_3)$	0	$+\infty$	$+\infty$	-5	-8	-13
$Lp_4=(p_2, t_2, p_8, t_8)$	5	1	6	$-\infty$	0	$-\infty$
$Lp_5=(p_4, t_4, p_5, t_5, p_1, t_1)$	9	$+\infty$	$+\infty$	$-\infty$	-7	$-\infty$
$Lp_6=(p_4, t_4, p_6, t_6)$	5	3	8	$-\infty$	0	$-\infty$
$Lp_7=(p_{11}, t_7, p_7, t_3)$	8	5	13	$-\infty$	0	$-\infty$
$Lp_8=(p_{11}, t_7, p_{12}, t_8)$	0	$+\infty$	$+\infty$	-1	-5	-6

Dans cette partie, deux algorithmes de calcul permettant de construire respectivement, une borne inférieure et une borne supérieure de la robustesse passive en un nœud sont présentés. L'algorithme permettant de calculer la borne supérieure de robustesse passive constitue notre contribution. Une étude comparative entre les deux algorithmes est élaborée.

III.3.2.1.1 Algorithme 1 de calcul de la robustesse passive d'un SED

A/ Méthodologie

L'algorithme de calcul, proposé par Jerbi, permet de construire une borne inférieure de la robustesse (marge de robustesse passive) au retard en un nœud donné afin d'éviter la violation des contraintes du cahier des charges.

Il consiste à :

- Choisir le nœud ou on désire calculer la marge de robustesse passive.
- Construire l'ensemble φ (ensemble des chemins monosynchronisés) défini comme suit :

$$\varphi = \{Lp_j / (n° = IN(Lp_j)) \wedge (Lp_j \in C_{ms}) \wedge (Lp_j \in G)\}$$

- Enlever d'un sous chemin monosynchronisé élémentaire de G (modèle RdP P-temporel) pour la construction de l'ensemble φ* défini comme suit :

$$\varphi^* = \{Lp_j / (p^* \in Lp_j) \wedge (Lp_j \in C_{se}) \wedge (Lp_j \in G^*)\}$$

- Calculer pour chaque chemin monosynchronisé sa marge de robustesse F :

$$F \Leftarrow \min_{j}\{\min_{p^o_i = OUT(Lp_j),\ p^o_i \notin Lp_j}[\Delta rt, (\Delta rc_j + F(G^* \backslash Lp_j, OUT(Lp_j)°, \min(b_i - q_{ie})))]\}$$

- Arrêter l'algorithme si la condition suivante est satisfaite :

$$(\varphi^* == \Phi \text{ ou } \Delta rt == 0) \text{ alors } (F \Leftarrow \Delta rt)$$

B/ Algorithme 1 [JER, 06f]

Ci-après l'algorithme de calcul d'une borne inférieure de la marge de robustesse passive au retard (Marge) d'un SED en un nœud n.

$$\varphi = \{Lp_j / (n° = IN(Lp_j)) \wedge (Lp_j \in C_{ms}) \wedge (Lp_j \in G)\}$$

$$Marge \Leftarrow \min_{j}[\Delta rc_j + F(G \backslash Lp_j, OUT(Lp_j)°, \min(b_i - q_{ie}))]_{p^o_i = OUT(Lp_j),\ p^o_i \notin Lp_j}$$

Δrc_j : la marge de retard compensable sur le sous chemin monosynchronisé Lp_j

```
F(G*, p*, Δrt)
  {
   φ* = {Lpj/ (p*∈Lpj)∧(Lpj∈Cse)∧(Lpj ∈G*)}
   Si (φ* == Φ ou Δrt == 0) alors (F ⇐ Δrt)

   Sinon
      {
         F ⇐ min{min[Δrt, (Δrcj + F(G*\ Lpj, OUT(Lpj)°, min (bi−qie)))]}
                j                                          p°i= OUT(Lpj)
```

$p^o_i \notin Lp_j$

}

}

Remarques

- La marge calculée par cet algorithme est une borne inférieure de la marge effective. Cette particularité apporte un problème de détection puisqu'il n'est pas possible de prouver qu'une défaillance a eu lieu quand une perturbation dépasse la dite borne inférieure.

- L'algorithme de calcul a permis de construire une borne inférieure à sa valeur en un point. Le fait d'obtenir qu'une borne inférieure pose des problèmes pour faire de la détection de violation de contraintes.

- L'algorithme de calcul a procuré une borne inférieure. Le fait de ne posséder qu'une borne inférieure ne permet pas a priori d'éviter les fausses alarmes (marge optimale).

- L'algorithme proposé est juste et rapide mais on ne peut pas prouver qu'on puisse compenser mutuellement une perturbation qui se propage sur deux chemins parallèles.

Exemple III.4

Calculons la marge de robustesse passive au retard en t_5, figure II.5.

$\varphi = \{Lp'=(p_1, t_1)\}$

Marge $\Leftarrow F(G\backslash Lp', p_2, +\infty)$

$\varphi^* = \{Lp_3, Lp_4\}$

$$F \Leftarrow \min \begin{cases} \min[+\infty, F(G\backslash Lp'\backslash Lp_3, p_4, +\infty)] \\ \min[+\infty, 5+F(G\backslash Lp'\backslash Lp_4, p_{13}, 1)] \end{cases}$$

Etape 1 : calcul de $F(G\backslash Lp'\backslash Lp_3, p_4, +\infty)$

$\varphi^* = \{Lp_6\}$

$F \Leftarrow \min[+\infty, 5+F(G\backslash Lp'\backslash Lp_3\backslash Lp_6, p_{11}, 3)]$

Etape 1.1 : calcul de $F(G\backslash Lp'\backslash Lp_3\backslash Lp_6, p_{11}, 3)$

$\varphi^* = \{Lp_7, Lp_8\}$

$$F \Leftarrow \min \begin{cases} \min[3, 8+ F(G\backslash Lp'\backslash Lp_3\backslash Lp_6\backslash Lp_7, p_4, 5)]=3 \\ \min[3, F(G\backslash Lp'\backslash Lp_3\backslash Lp_6\backslash Lp_8, p_{13}, +\infty)] \end{cases}$$

Etape 1.1.1 : calcul de $F(G\backslash Lp'\backslash Lp_3\backslash Lp_6\backslash Lp_8, p_{13}, +\infty)$

$\varphi^* = \{Lp_1, Lp_2\}$

$$F \Leftarrow \min \begin{cases} \min[+\infty, 18+F(G\backslash Lp'\backslash Lp_3\backslash Lp_6\backslash Lp_8\backslash Lp_1, p_{11}, +\infty)] \\ \min[+\infty, 7+F(G\backslash Lp'\backslash Lp_3\backslash Lp_6\backslash Lp_8\backslash Lp_2, p_2, 9)] \end{cases}$$

Etape 1.1.1.1 : calcul de $F(G\backslash Lp'\backslash Lp_3\backslash Lp_6\backslash Lp_8\backslash Lp_1, p_{11}, +\infty)$

$\varphi^* = \Phi$ alors $F \Leftarrow +\infty$

Etape 1.1.1.2 : calcul de $F(G\backslash Lp'\backslash Lp_3\backslash Lp_6\backslash Lp_8\backslash Lp_2, p_2, 9)$

$\varphi^* = \Phi$ alors $F \Leftarrow 9$

Etape 2 : calcul de $F(G\backslash Lp'\backslash Lp_4, p_{13}, 1)$

$\varphi^* = \{Lp_1, Lp_2\}$

$$F \Leftarrow \min \begin{cases} \min[1, 18+F(G\backslash Lp'\backslash Lp_4\backslash Lp_1, p_{11}, +\infty)]=1 \\ \min[1, 7+F(G\backslash Lp'\backslash Lp_4\backslash Lp_2\backslash Lp_8, p_2, +\infty)]=1 \end{cases}$$

Il vient : Marge $\Leftarrow$ 6

III.3.2.1.2 Approche proposée pour le calcul de la robustesse passive d'un SED en un nœud n (cas d'un retard)

A/ But

Dans cette partie nous proposons un algorithme permettant de calculer une borne supérieure de la robustesse passive. En effet, le fait de ne posséder qu'une borne inférieure pose des problèmes pour faire de la détection de violation de contraintes. En l'état, il existe une plage de valeurs où nous sommes incapables d'affirmer si le traitement effectué sur les produits est correct ou non.

Le but de cet algorithme est :

- d'éviter la violation des contraintes du cahier de charge,
- d'éviter les fausses alarmes,
- de compenser mutuellement une perturbation qui se propage sur deux chemins parallèles,
- d'imposer des contraintes sur les valeurs de δ_i (δ_i est la perturbation maximale qui se propage sur un chemin parallèle au chemin de la propagation de la perturbation).

B/ Algorithme de calcul de la robustesse passive au retard d'un SED en un nœud n

Ci-après un algorithme de calcul d'une borne supérieure de la marge de robustesse passive au retard (Marge) d'un SED en un nœud n.

Soient

$L = \bigcup_i Lp_i$: union des Chemins monosynchronisés

Δrc_j : la marge de retard compensable sur le sous chemin monosynchronisé Lp_j

Res (L, Lp) : Résidu maximale de perturbation transmissible en OUT(Lp) (perturbation qui se propage sur un chemin parallèle)

$E(L, Lp) = \{L / (OUT(L) = OUT(Lp)) \wedge (\sum_{p \in L} M_0(p) = \sum_{p \in Lp} M_0(p)) \wedge (\delta \in L \wedge \delta = IN(L))\}$

$\varphi = \{Lp_j / (n° = IN(Lp_j)) \wedge (Lp_j \in C_{ms}) \wedge (Lp_j \in G)\}$

$$\text{Marge} \Leftarrow \min_{j}\left[\Delta rc_j + \min_{\substack{p^o_i = OUT(Lp_j) \\ p^o_i \notin Lp_j}} F(G \backslash Lp_j, OUT(Lp_j)°, \min_{\substack{L / (p_i \notin L) \wedge (p_i° = OUT(Lp_j))}} (b_i - q_{ie}) + \delta_i)\right]$$

$F(G^*, p^*, \Delta rt)$

{

$\varphi^* = \{Lp_j / (p^* \in Lp_j) \wedge (Lp_j \in C_{se}) \wedge (Lp_j \in G^*)\}$

Si ($\varphi^* == \Phi$ ou $\Delta rt == 0$) alors ($F \Leftarrow \Delta rt$)

Sinon

{

$$F \Leftarrow \min_{j}\{\min[\Delta rt, (\Delta rc_j + \min_{\substack{p^o_i = OUT(Lp_j) \\ p^o_i \notin Lp_j}} F(G^* \backslash Lp_j, OUT(Lp_j)°, \min_{\substack{p_i \notin L \\ p_i° = OUT(Lp_j))}} (b_i - q_{ie}) + \delta_i))]\}$$

}

}

Exemple III.5

Calculons la marge de robustesse passive au retard en t_5, figure III.4.

$\varphi = \{Lp' = (p_1, t_1)\}$

$\text{Marge} \Leftarrow F(G \backslash Lp', p_2, +\infty)$

$\varphi^* = \{Lp_3, Lp_4\}$ et ($L_1 = Lp' \cup Lp_3$; $L_2 = Lp' \cup Lp_4$)

$F \Leftarrow \min \begin{cases} \min[+\infty, F(G \backslash Lp' \backslash Lp_3, p_4, +\infty)] \\ \min[+\infty, 5 + F(G \backslash Lp' \backslash Lp_4, p_{13}, 1 + \delta_1)] \end{cases}$ (δ_1 est le résidu d'une perturbation qui se propage le long du chemin $Lp_8 = (p_{11}, t_7, p_{12}, t_8)$)

Etape 1 : calcul de $F(G\backslash Lp'\backslash Lp_3, p_4, +\infty)$

$\varphi^* = \{Lp_6\}$

$F \Leftarrow \min[+\infty, 5+F(G\backslash Lp'\backslash Lp_3\backslash Lp_6, p_{11}, 3 + \delta_2)]$

Etape 1.1 : calcul de $F(G\backslash Lp'\backslash Lp_3\backslash Lp_6, p_{11}, 3 + \delta_2)$ (δ_2 est la résidu maximale d'une perturbation qui se propage le long du chemin $Lp_1=(p_{13}, t_9, p_{14}, t_{10}, p_{15}, t_{11}, p_{16}, t_{12}, p_{10}, t_6)$

$\varphi^* = \{Lp_7, Lp_8\}$

$$F \Leftarrow \min\begin{cases}\min[3+ \delta_2, 8+ F(G\backslash Lp'\backslash Lp_3\backslash Lp_6\backslash Lp_7, p_4, 5 + \delta_3)]= 3+ \delta_2 \\ \min[3+ \delta_2, F(G\backslash Lp'\backslash Lp_3\backslash Lp_6\backslash Lp_8, p_{13}, +\infty)]\end{cases}$$

Etape 1.1.1: calcul de $F(G\backslash Lp'\backslash Lp_3\backslash Lp_6\backslash Lp_8, p_{13}, +\infty)$

$\varphi^* = \{Lp_1, Lp_2\}$

$$F \Leftarrow \min\begin{cases}\min[+\infty, 18+F(G\backslash Lp'\backslash Lp_3\backslash Lp_6\backslash Lp_8\backslash Lp_1, p_{11}, +\infty)] \\ \min[+\infty, 7+F(G\backslash Lp'\backslash Lp_3\backslash Lp_6\backslash Lp_8\backslash Lp_2, p_2, 9 + \delta_4)]\end{cases}$$

Etape 1.1.1.1 : calcul de $F(G\backslash Lp'\backslash Lp_3\backslash Lp_6\backslash Lp_8\backslash Lp_1, p_{11}, +\infty)$

$\varphi^* = \Phi$ alors $F \Leftarrow +\infty$

Etape 1.1.1.2 : calcul de $F(G\backslash Lp'\backslash Lp_3\backslash Lp_6\backslash Lp_8\backslash Lp_2, p_2, 9 + \delta_4)$

$\varphi^* = \Phi$ alors $F \Leftarrow 9 + \delta_4$

Etape 2 : calcul de $F(G\backslash Lp'\backslash Lp_4, p_{13}, 1 + \delta_1)$

$\varphi^* = \{Lp_1, Lp_2\}$

$$F \Leftarrow \min\begin{cases}\min[1+ \delta_1, 18+F(G\backslash Lp'\backslash Lp_4\backslash Lp_1, p_{11}, +\infty)]=1+ \delta_1 \\ \min[1+ \delta_1, 7+F(G\backslash Lp'\backslash Lp_4\backslash Lp_2\backslash Lp_8, p_2, +\infty)]=1+ \delta_1\end{cases}$$

Il vient : **Marge** $\Leftarrow 6+ \delta_1$ donc **Marge**$\Leftarrow$ **7** puisque ($\delta_1 \leq 1$; $\delta_2 \leq 3$; $\delta_4 \leq 9$)

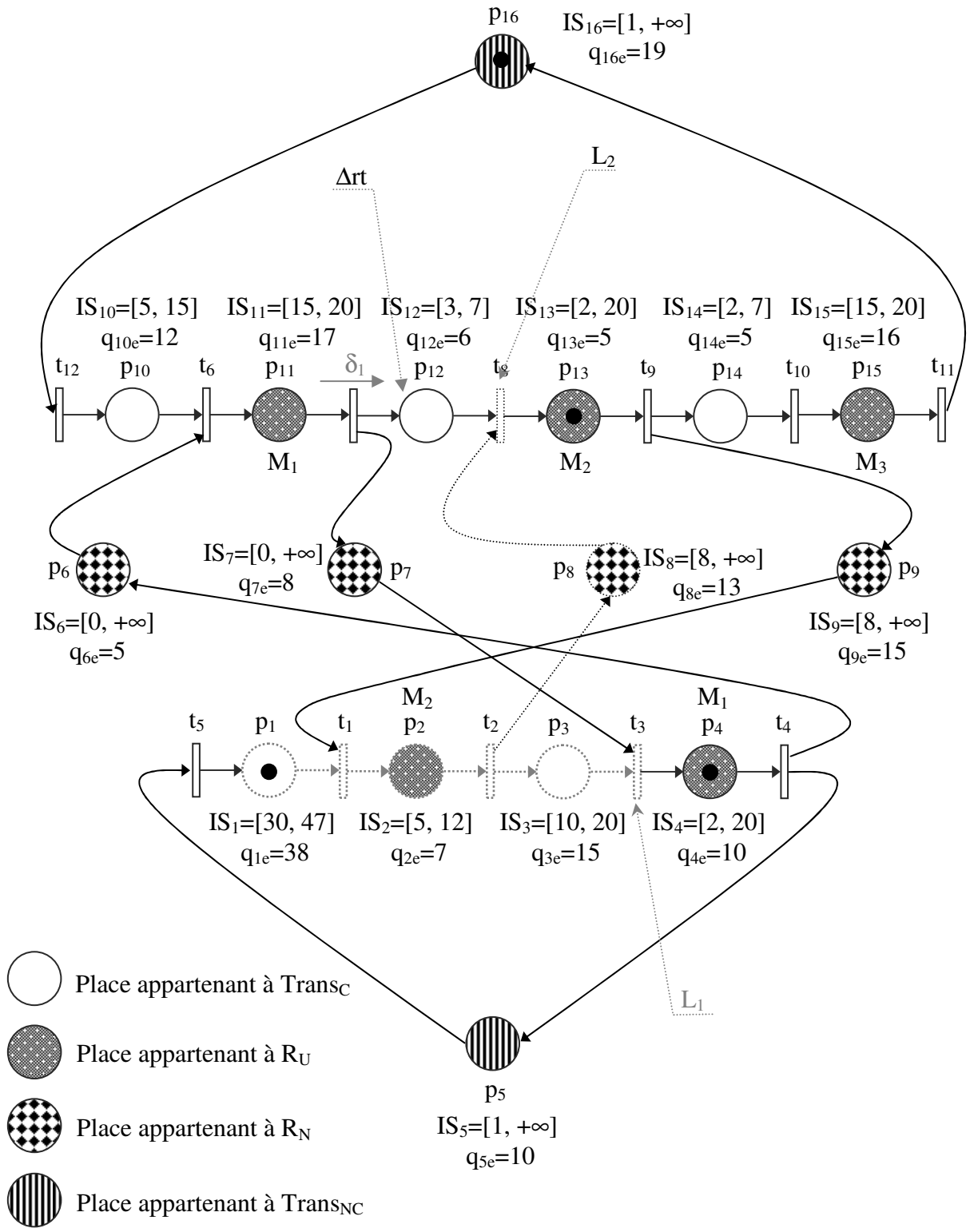


Figure III.4 : Exemple de calcul d'une marge de robustesse en t_5

Remarques

- L'algorithme de calcul a permis de construire une borne supérieure à sa valeur en un point.

- Le fait de posséder une borne supérieure permet de détecter la violation de contraintes du cahier de charge mais on peut prouver qu'une défaillance a eu lieu quand une perturbation dépasse la borne dite supérieure.

III.3.2.2 Conclusion

Une définition locale de la robustesse passive à l'entrée d'un chemin a été établie. Une application d'un premier algorithme de calcul (approche de Jerbi) a permis de calculer une borne inférieure de la robustesse au retard en un nœud donné.

Un deuxième algorithme a été élaboré. Il a permis de construire une borne supérieure de la robustesse en un nœud n. Le fait de posséder une borne supérieure a donné la possibilité d'éviter la violation des contraintes du cahier des charges qui se matérialise par la mort de marques et d'éviter les fausses alarmes.

La borne supérieure de robustesse passive est fine puisque elle permet d'augmenter la faculté du système à maintenir les qualités spécifiées pour les sorties sans qu'aucune nouvelle action spécifique ne soit mise en œuvre (pas de changement de la conduite).

L'algorithme proposé considère que la transmission d'une perturbation sur deux chemins parallèles puisse donner lieu à une compensation mutuelle.

L'inconvénient de cette algorithme est qu'il ne nous permet pas de spécifier une plage de valeurs où nous sommes capables d'affirmer si le traitement effectué sur les produits est correct ou non (on ne dispose que d'une borne inferieure et une supérieure).

III.3.3 Robustesse active

Le milieu industriel est assujetti à de nombreux événements perturbants qui induisent des variations des temps de séjour initialement fixés par la couche d'ordonnancement.

Une perturbation temporelle, dépassant les bornes de robustesse passive, peut engendrer une violation de contraintes du cahier des charges s'il n'y a pas un changement de la conduite.

Dans les RdP P-temporels, cette violation de contraintes se matérialise par la mort de marques. Afin d'éviter la mort des marques au niveau des transitions de synchronisations, trois stratégies de commande robuste face aux perturbations temporelles dans des ateliers à contraintes de temps ont été développées. La première est proposée par Jerbi [JER, 09a], la deuxième et la troisième approche constituent notre contribution.

III.3.3.1 Stratégies de commande robuste face aux perturbations

III.3.3.1.1 Introduction

Lorsque l'ordre des opérations est fixé, le calcul des instants de mise à feu des transitions du RdP P- temporel modélisant le système reste un problème critique. Nous présentons alors trois stratégies de commande robuste face aux perturbations temporelles. La première consiste à générer par la commande un décalage temporel de même nature que la perturbation afin d'éviter la mort de marques aux niveaux des transitions de synchronisation du modèle RdP P- temporel. La deuxième, constitue notre contribution, se propose de rejeter la perturbation dès son observation en jouant sur la commande. Enfin, la troisième est une synthèse mixte des deux précédentes.

III.3.3.1.2 1ère approche : Génération par la commande d'un décalage temporel de même nature que la perturbation

A/ Principe

Afin d'éviter cette mort des marques, au niveau des transitions de synchronisation, une approche a été développée dans [JER, 09a]. Elle consiste à poser le problème de commandabilité sur les chemins parallèles qui mènent à la transition de synchronisation considérée. Le but est de rechercher, sur un chemin parallèle donné, un ensemble de transitions commandables. Sur ces transitions, essayer de générer par la commande un décalage temporel de même nature que la perturbation (avance ou retard) afin d'éviter la mort de marques prévue.

Une méthodologie de construction de chemins localement commandables et commandables a été élaborée. Elle a abouti à l'énoncé d'un théorème donnant une condition suffisante de l'existence de la robustesse active.

B/ Théorème de robustesse active

Pour résoudre un problème de commande temporelle robuste, est élaboré un théorème de robustesse active en une transition de synchronisation. Le but est d'envisager de résoudre les problèmes localement les uns après les autres afin de résoudre le problème global.

Théorème 1 [JER, 09a]:

Soient :

$t \in T_O$, $p_k \in P$, $h \in P \cup T$, $m \in T_S$,

$Sp^\circ_{ke}(n)$: le $n^{ème}$ instant de tir prévu de la transition p°_k,

$St(n)$: le $n^{ème}$ instant de tir effectif de la transition t,

Lp_k : le $k^{ème}$ chemin dont la place d'entrée p_k contient un jeton synchronisé en m avec le jeton perturbé en h et tel que : $(OUT(Lp_k)^{\circ\circ}=m)$ et $(Sp^\circ_{ke}(n) > St(n))$,

p_j : la place par laquelle l'impact de la commande arrive à la transition m ($p^\circ_j=m$ et $p_j=OUT(Lp_k)^\circ$),

p_z : la place par laquelle la perturbation arrive en m ($p^\circ_z=m$),

EC(h,m) : l'ensemble des chemins orientés qui relient h à m,

$$CP_r = \{Lp_j \in EC(h,m) / \; Cr(Lp_j) = \min_{L_i \in EC(h,m)}(Cr(L_i)) \}, \qquad \text{III.5}$$

$$CP_a = \{Lp_j \in EC(h,m) / \; Ca(Lp_j) = \max_{L_i \in EC(h,m)}(Ca(L_i)) \} \qquad \text{III.6}$$

Une condition suffisante pour que le système considéré possède une robustesse active locale en une transition de synchronisation m suite à une perturbation δ en h, observable en t, est qu'il existe au moins un chemin $Lpc \in \{Lp_k\}$ commandable sur $[\Delta_{min}, \Delta_{max}]$ tel que :

- $\delta_C \in [\Delta_{min}, \Delta_{max}]$,
- $(Lpc \cap CP_a) = \Phi$, dans le cas d'une avance,
- $(Lpc \cap CP_r) = \Phi$, dans le cas d'un retard.

La valeur de δ_C peut être calculée de la manière suivante :

– Considérant une avance :

$$\delta_C = \min_{L_i \in EC(h,m)}[0, \delta - \max(Ca(L_i)) - (a_j - q_{je}) - (q_{ze} - b_z)] \qquad \text{III.7}$$

– Considérant un retard :

$$\delta_C = \max_{L_i \in EC(h,m)}[0, \delta - \min(Cr(L_i)) - (b_j - q_{je})] \qquad \text{III.8}$$

Lemme 1 [MHA, 08]

- Soit Lp_i et Lp_j deux chemins monosynchronisés tel que : OUT (Lp_i)=OUT (Lp_j)= ts.
- Soit une perturbation temporelle au retard (resp. en avance) ($\delta \in Lp_i \wedge \delta = IN(Lp_i)$)
- Soit Lp_j : le $j^{ème}$ chemin dont la place d'entrée p_j contient un jeton synchronisé en m avec le jeton perturbé en Lp_i.

Si à l' instant τ de l'observation de la perturbation :

$$\{\nexists \; t \in T / \; t \in (Tc \wedge Lp_j) \}$$

Alors l'approche de génération par la commande, d'un décalage temporel de même nature que la perturbation n'est pas applicable

Preuve

- Considérons deux chemins monosynchronisés Lp_i et Lp_j de la figure III.5, tel que OUT(Lp_i)= OUT(Lp)= ts.

– Soit δ' le résidu d'une perturbation temporelle au retard (resp en avance) δ $(\delta \in Lp_i \wedge \delta = IN(Lp_i))$

Si $\delta' > (b_j - q_{je}) / \{(p^o_j \in T_S) \wedge (p_j \notin Lp_i) \wedge (p^o_j \in Lp_i)\}$, alors le mort de marque au niveau de la transition de synchronisation p^o_j est inévitable

Sur un chemin parallèle donné (Lp_j), si on n'a pas au moins une transition commandables ($t \in T_C$), on ne peut pas générer par la commande un décalage temporel de même nature que la perturbation (avance ou retard). Par suite on ne peut pas éviter la mort de marques prévue et l'approche de génération d'un décalage temporelle de même nature que la perturbation est n'est pas applicable.

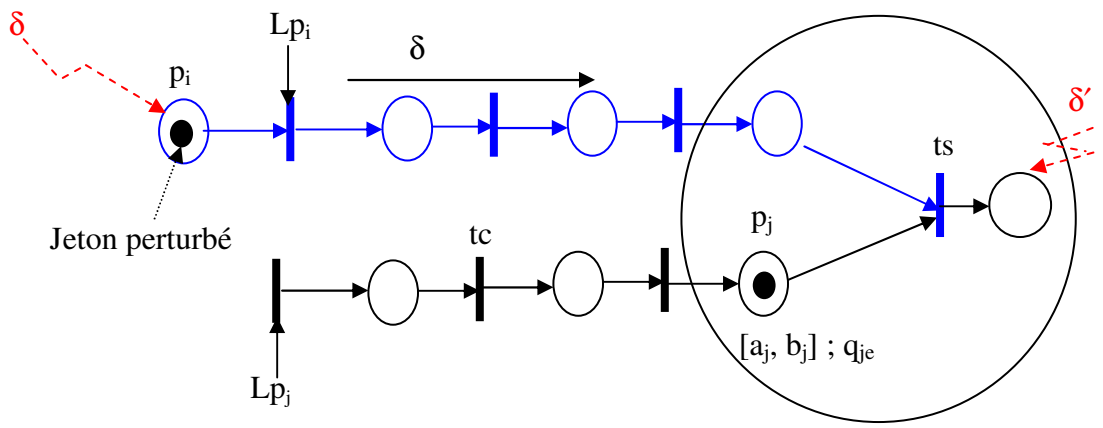


Figure III.5 : Exemple de propagation de la perturbation sur deux chemins parallèles

Dans la suite, nous donnons un algorithme permettant de calculer la marge de retard totale disponible qu'on peut injecter sur les chemins parallèles.

C/ Algorithme de calcul de la marge de robustesse active en un nœud n

C-1/ Algorithme [MHA, 08]

Ci-après un algorithme récursif permettant d'appliquer l'approche de génération, par la commande, d'un décalage temporel de même nature que la perturbation, en un nœud n.

Afin d'éviter la mort de marque aux niveaux des transitions de synchronisation, l'algorithme présenté permet de calculer la marge de retard totale disponible qu'on peut injecter sur les chemins parallèles permet d'éviter la violation des contraintes et la rupture des spécifications du cahier des charges. Conformément à la définition des RdP P-temporels, les violations de contraintes se matérialisent par la mort de marques dans les places en amont des transitions de synchronisation.

Algorithme

Soient

– G le modèle RdP P-temporel de l'atelier,
– $Cr(Lp_j)$: la capacité de rejet temporel passif à un retard d'un sous chemin

monosynchronisé Lp_j,

- δ une perturbation temporelle au retard en p_i (nœud n), observée en une transition t ($t \in T_O$),
- $\delta_C \in [\Delta_{min}, \Delta_{max}]$ (perturbation de commande)

$\varphi = \{Lp_j / (n = IN(Lp_j)) \wedge (Lp_j \in C_{ms}) \wedge (Lp_j \in G)\}$

$$\text{Marge} \Leftarrow \min_{j} [Cr(Lp_j) + F(G \backslash Lp_j, OUT(Lp_j)^\circ, \min_{\substack{p^o_i = OUT(Lp_j) \\ p_i \notin Lp_j}} (b_i - q_{ie}) + \delta_C)]$$

F(G*, p*, Δrt)

{

$\varphi^* = \{Lp_j / (p^* \in Lp_j) \wedge (Lp_j \in C_{se}) \wedge (Lp_j \in G^*)\}$

Si ($\varphi^* == \Phi$ ou $\Delta rt == 0$) alors ($F \Leftarrow \Delta rt$)

Si non

{

$$F \Leftarrow \min\{\min_{j}[\Delta rt, (Cr(Lp_j) + F(G^* \backslash Lp_j, OUT(Lp_j)^\circ, \min_{\substack{p^o_i = OUT(Lp_j) \\ p_i \notin Lp_j}} (b_i - q_{ie}) + \delta_C)]\}$$

}

}

C-2/ Description de l'algorithme

Soient

- E_p (respectivement $E_{OUT(Lp)^\circ}$) l'ensemble des chemins monosynchronisés avales (de sortie) contenant la place p (respectivement OUT(Lp)°). La place p est le lieu d'occurrence de la perturbation δ,
- δ' est le résidu de la perturbation δ.

{

$F = \{\delta', OUT(Lp)\}$ (F est un doublet composé du résidu de la perturbation et du nœud de sortie du chemin Lp)

$Lp \in E_p \Rightarrow \delta' = \delta - Cr(Lp)$

Si

$\delta' > (b_i - q_{ie}) / \{(p^o_i \in T_S) \wedge (p_i \notin Lp) \wedge (p^o_i \in Lp)\}$

$\Rightarrow$ Problème de commande en p^o_i (application du théorème 1)

Si non

$\delta' < (b_i - q_{ie}) / \{(p^o_i \in T_S) \wedge (p_i \notin Lp) \wedge (p^o_i \in Lp)\}$, on applique la même procédure pour chaque élément de $E_{OUT(Lp)^\circ}$.

}

Preuve de l'algorithme

Prenons l'exemple de la figure III.6.

Soit δ une perturbation au retard à l'entrée des sous chemins monosynchronisés Lp_1 et Lp_2 (on suppose que la transmission d'une perturbation sur deux chemins parallèles ne donne pas lieu à une compensation mutuelle).

Soit le cas de la figure III.7. La marge disponible au retard d'une place p_i est : fr $(p_i)= (b_i-q_{ie})$.

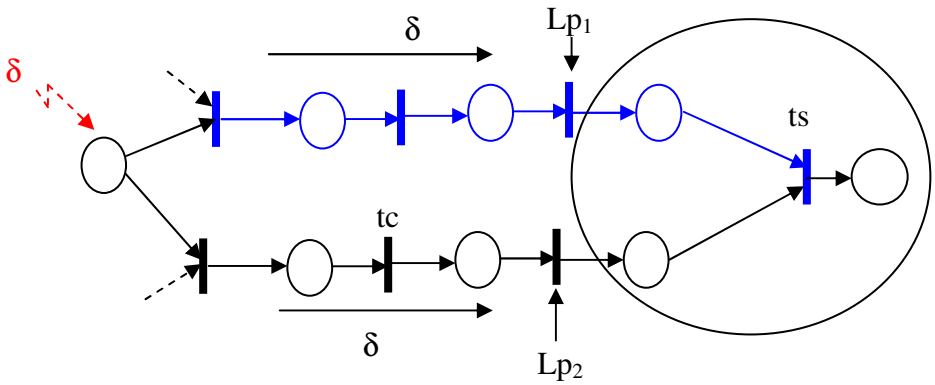


Figure III.6 : Exemple de propagation d'une perturbation sur deux chemins parallèles

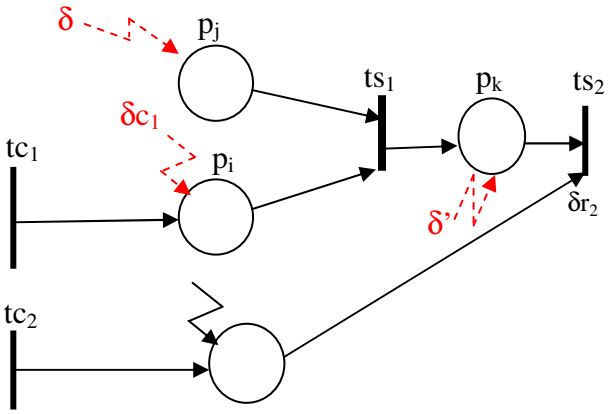


Figure III.7: Propagation de la perturbation sur deux chemins localement commandables

Soit δ' le résidu de la perturbation δ en p_k ($\delta' \leq \delta$). Deux cas se présentent

- **1er cas**

Si $(b_i-q_{ie}) > \delta \geq \delta'$, il n'y a pas de mort de marque en p_i.

- **2ème cas**

Si $(b_i-q_{ie}) < \delta' < \delta$, il y a mort de marque en p_i et par la suite on calcule la valeur de δ_C :

$$\delta_{C1} \in [\Delta_{min}, \Delta_{max}] \Rightarrow (b_i-q_{ie}) > \underbrace{\delta-\delta_C}_{\delta'} \Rightarrow \delta_C > \delta-(b_i-q_{ie})$$

On peut conclure que si la perturbation est écrasée, on pourra éviter la mort de marque au niveau des transitions de synchronisation.

D/ Application de la première stratégie à un atelier sans postes d'assemblage (atelier multi-produits)

Soit une perturbation, δ=15 en p_{13}, observée en t_9 (Figure III.8).

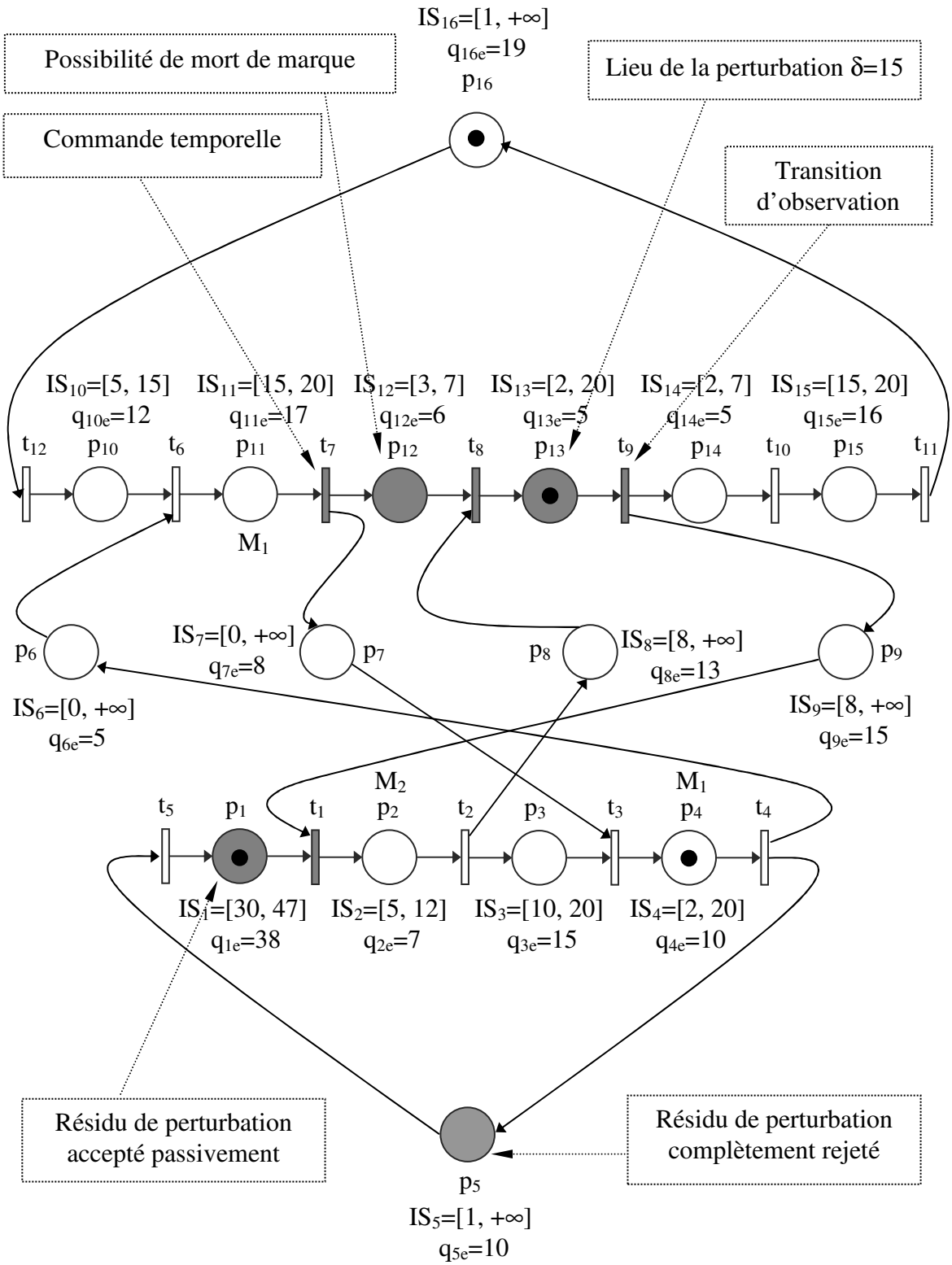


Figure III.8 : Exemple de propagation de la perturbation : application de la première stratégie [JER, 06f]

Le temps de séjour réel du jeton dans la place p_{13} est alors égal à $q_{13}=q_{13e}+15=20$. Par conséquent, il n'y a pas de mort de marque en p_{13} ($IS_{13}=[2, 20]$) et l'on a $St_9(n)=St_{9e}(n)+15$. La perturbation δ est propagée vers les deux chemins $Lp_1= (t_9, p_{14}, t_{10}, p_{15}, t_{11}, p_{16}, t_{12}, p_{10}, t_6)$ et $Lp_2=(t_9, p_9, t_1)$. Sur le chemin Lp_1, la perturbation est totalement rejetée en p_{16} ($Cr(Lp_1)=18$) et l'on a $St_{12}(n+1)=St_{12e}(n+1)$.

Sur le chemin Lp_2 ($Cr(Lp_2)=7$), la perturbation provoque passivement le changement de l'instant de tir de t_1 et le changement du temps de séjour dans la place p_1 : $St_1(n)=St_{1e}(n)+8$ et $q_1=q_{1e}+8=46$. Il n'y a pas de mort de marque en p_1 puisqu'on peut accepter un retard égal à 9 ($IS_1=[30, 47]$, $q_{1e}=38$).

Une fois passé par t_1, le résidu de la perturbation se propage vers les deux chemins $Lp_3=(p_2, t_2, p_8, t_8)$ et $Lp_4=(p_2, t_2, p_3, t_3)$. Une partie du résidu est rejetée en p_8 et le jeton perturbé est disponible en p_8 avec un retard égal à 3 ($Cr(Lp_3)=5$). Sachant que la marge de retard disponible en p_{12} est égale à 1, une mort de marque en p_{12} est inévitable dans le cas de la robustesse passive.

Soit $\delta'=3$, le résidu en t_8 de la perturbation initiale δ. L'équation (4) donne : $\delta_C=15-12-1=2$.

Lorsque la perturbation a été observée en t_9 ($St_9(n)=St_{9e}(n)+15$), un jeton est en train de séjourner en p_{11} depuis 3 u.t., selon les instants initiaux de tir des transitions. Ce jeton appartient au chemin $Lpc=(p_{11}, t_7, p_{12}, t_8)$. Il est synchronisé en t_8 avec le jeton perturbé en p_{13} et son instant de tir vérifie que : $St_{7e}(n) > St_9(n)$.

Si la transition t_7 est commandable ($t_7 \in T_C$), elle constitue un sous chemin localement commandable sur la plage $[-2, 3]$, selon la définition III.14. Il vient de même que le chemin Lpc est localement commandable sur $[-2, 3]$, selon la définition III.15. Il est à remarquer aussi que $\delta_C \in [-2, 3]$. Si nous forçons, par la commande, le franchissement de la transition t_7 de façon à avoir $St_7(n)=St_{7e}(n)+2$, un retard volontaire égal à $\delta_C=2$ est introduit en t_7. De ce fait, la mort de marque en p_{12} est évitée et l'instant de tir effectif de la transition t_8 vérifie que: $St_8(n)=St_{8e}(n)+3$.

Le retard introduit par la commande est complètement rejeté sur le chemin $Lp_7= (p_7, t_3)$ ($Cr(Lp_7)=8$).

Après le franchissement de la transition t_8, le résidu $\delta'=3$ est transmis aux deux chemins Lp_1 et Lp_2 à travers la place p_{13} de départ. Il est facile de vérifier que ce résidu est complètement rejeté par ces deux chemins. Ce qui ce traduit par : $St_{12}(n+2)=St_{12e}(n+2)$ et $St_1(n+1)=St_{1e}(n+1)$.

Dans le chemin $Lp_4= (p_2, t_2, p_3, t_3)$, un jeton est arrivé en p_3 avec un retard égal à 8. Ceci ne provoque pas de mort de marque en p_7 puisque la marge de robustesse au retard en p_7 est égale à $+\infty$ (machine en attente). La transition t_3 est alors franchie à l'instant $St_3(n)=St_{3e}(n)+8$. Un résidu de perturbation égal à 8 est transmis aux chemins $Lp_5=(p_4, t_4, p_6, t_6)$ et $Lp_6=(p_4, t_4, p_5, t_5, p_1, t_1)$. Sur le chemin Lp_6, il est complètement rejeté en p_5 : $St_5(n+1)=St_{5e}(n+1)$. Sur le chemin Lp_5, une partie est rejetée ($Cr(Lp_5)=5$) et le reste égal à 3 est transmis à la place p_{11} à travers t_6. Ce dernier résidu est complètement rejeté en p_7, p_9 et p_{16}. Le système revient alors à son état normal sans aucune perturbation.

III.3.3.1.3 2ème approche : Compensation de la perturbation dés son observation

A/ Principe

La nouvelle approche que noud proposons, consiste à rejeter la perturbation dés son observation [JER, 09a]. Si la perturbation est de type retard (respectivement avance), on génère des avances (respectivement retards) sur les tirs des transitions commandables des chemins de propagation de la perturbation.

Dans le but de construire une axiomatique rigoureuse similaire à la première approche, nous donnons deux lemmes concernant le rejet local des perturbations temporelles.

Lemme 2 [JER, 09a]

Soit Lp un chemin monosynchronisé et soit δ une perturbation temporelle au retard à l'entrée de ce chemin ($\delta > 0$).

Si le chemin Lp est localement commandable sur la plage $[\Delta_{min}, \Delta_{max}]$ tel que $-\Delta_{min} \geq \delta$, la perturbation δ peut être rejetée localement, par la commande, par Lp.

Preuve

D'après la définition III .14, nous avons la possibilité de générer, par la commande, une avance $\delta_a \in [\Delta_{min}, 0]$ à la sortie du chemin Lp. Si nous prenons $\delta_a = -\delta$, la transition de synchronisation du chemin Lp est tirée comme prévu. La perturbation est rejetée localement par le chemin Lp.

Exemple III.6

Considérons le chemin monosynchronisé Lp= (p_2, t_2, p_3, t_3) de la figure III.9.

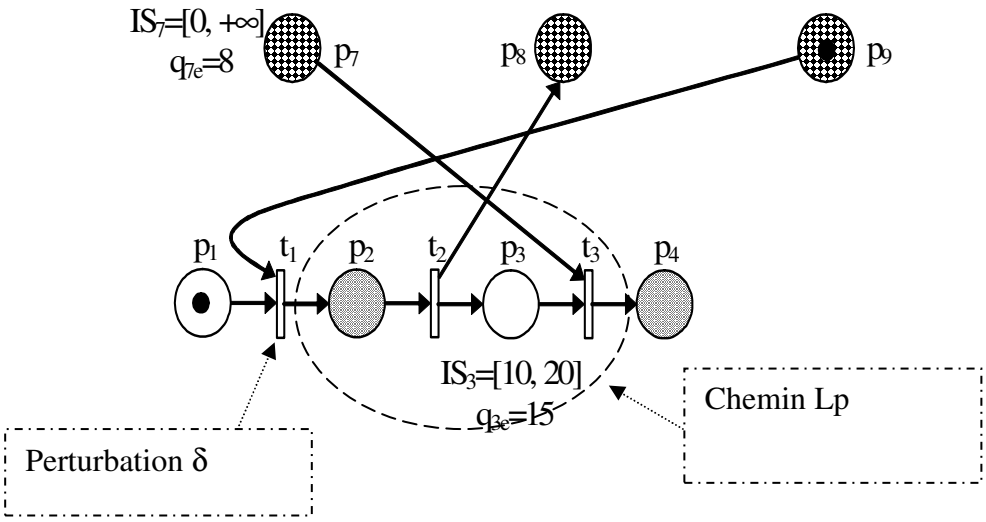


Figure III. 9: Rejet d'une perturbation

Soit δ=5 une perturbation temporelle au retard affectant le tir de la transition t_1 : $St_1(n)=St_{1e}(n)+5$.

Un jeton arrive alors à la place p_2 avec un retard égal à 5. En conséquence, la transition t_2 est tirée en retard de 5 : $St_2(n)=St_{2e}(n)+5$. La transition de synchronisation t_3 est tirée en retard de 5 : $St_3(n)=St_{3e}(n)+5$, lorsque $q_3=q_{3e}=15$ et $q_7=13$. Un retard égal à 5 est transmis de t_3 à p_4.

Supposons que la transition t_3 est commandable ($t_3 \in T_C$).D'après la définition III.14, il vient :

$p^\circ_3=t_3 \Rightarrow f_a(p_3)=10-15=-5$ et $f_r(p_3)=20-15=5$
$p^\circ_7=t_3 \Rightarrow f_a(p_7)=0-8=-8$ et $f_r(p_7)=+\infty$

$$\max_{p^\circ_i=t_3}(f_a(p_i))=\max(-5,-8)=-5 \;;\; \min_{p^\circ_i=t_3}(f_r(p_i))=\min(5,+\infty)=5$$

La transition t_1 constitue alors un sous chemin élémentaire localement commandable sur [−5, 5]. Vu que t_3 est la seule transition supposée commandable, le chemin Lp est localement commandable sur [−5, 5].

Le rejet local de la perturbation sur le chemin Lp s'effectue en forçant le tir de la transition t_3 dés que le temps de séjour dans la place p_3 est égal à $q_3=10$. Dans ce cas, on a : $St_3(n)=St_{3e}(n)$ et $q_7=q_{7e}=8$.

Lemme 3 [JER, 09a]

Soit Lp un chemin monosynchronisé et soit δ une perturbation temporelle à l'avance à l'entrée de ce chemin ($\delta < 0$).

Si le chemin Lp est localement commandable sur la plage $[\Delta_{min}, \Delta_{max}]$ tel que $-\Delta_{max} \leq \delta$, la perturbation δ peut être rejetée localement, par la commande, par Lp.

Preuve

D'après la définition III .14, nous avons la possibilité de générer, par la commande, un retard $\delta_r \in [0, \Delta_{max}]$ à la sortie du chemin Lp. Si nous prenons $\delta_r = -\delta$, la transition de synchronisation du chemin Lp est tirée comme prévu. La perturbation est rejetée localement par le chemin Lp.

Exemple III.7

Reprenons l'exemple précédent avec une perturbation à l'avance, $\delta=-5$, affectant le tir de la transition t_1 : $St_1(n)=St_{1e}(n)-5$.

Supposons d'abord qu'aucune transition n'est commandable.

Un jeton arrive alors à la place p_2 avec une avance égale à −5. En conséquence, la transition t_2 est tirée en avance de 5 : $St_2(n)=St_{2e}(n)-5$. La transition de synchronisation t_3 est

tirée en avance de 3 : $St_3(n)=St_{3e}(n) -5$, lorsque $q_3=q_{3e}=15$ et $q_7=3$. Une avance égale à −5 est transmise de t_3 à p_4.

Maintenant, si la transition t_3 est commandable, le chemin Lp est localement commandable sur [−5, 5]. Le rejet local de la perturbation sur le chemin Lp s'effectue en forçant le tir de la transition t_3 lorsque le temps de séjour dans la place p_3 est égal à $q_3=18$. Dans ce cas, on a : $St_3(n)=St_{3e}(n)$ et $q_7=q_{7e}=8$.

Lemme 4

Soit Lp un chemin monosynchronisé et localement commandable sur la plage $[\Delta_{min}, \Delta_{max}]$ et soit δ une perturbation temporelle au retard (respectivement à l'avance) à l'entrée de ce chemin. La perturbation δ peut être rejetée localement, par la commande, par Lp si

$$\Delta_{min} \leq \delta \leq \Delta_{max}$$

Preuve

D'après les lemmes 2 et 3 on en déduit le lemme 4.

B/ Algorithme

Soient :

- Lp un chemin localement commandable sur la plage $[\Delta_{min}, \Delta_{max}]$
- δ' : résidu de la perturbation δ ($\delta'=\delta - Cr(Lp)$)
- $t \in T_C$ (t constitue un sous chemin élémentaire localement commandable sur la plage $[\max(f_a(p_i)), \min(f_r(p_i))]$)
  $p^o_i=t$ $p^o_i=t$

Si
$-\Delta_{min} \geq \delta'$ et $\delta' >0$ (la perturbation δ' peut être rejetée localement, par la commande, par Lp).
Si non
Mort de marques au niveau des transitions de synchronisation

C/ Exemples d'application de la deuxième stratégie

C-1/ Application de la deuxième stratégie à un atelier multi-produits

L'exemple suivant permet d'illustrer cette stratégie.

Considérons la même perturbation, $\delta=15$ en p_{13}, observée en t_9 (Figure III.10) et supposons que la transitions t_2 est commandable.

D'après la définition III.15, la transition t_2 constitue un sous chemin élémentaire localement commandable sur [−2, 5]. En effet, $f_a(p_2)=-2$ et $f_r(p_2)=5$. La perturbation δ est propagée vers les deux chemins $Lp_1=(t_9, p_{14}, t_{10}, p_{15}, t_{11}, p_{16}, t_{12}, p_{10}, t_6)$ et $Lp_2=(t_9, p_9, t_1)$. Sur le chemin Lp_1, la perturbation est totalement rejetée en p_{16} ($Cr(Lp_1)=18$). Sur le chemin Lp_2 ($Cr(Lp_2)=7$), la perturbation provoque passivement le changement de l'instant de tir de t_1 et le changement du temps de séjour dans la place p_1 : $St_1(n)=St_{1e}(n)+8$ et $q_1=q_{1e}+8=46$. Une fois passé par t_1, le résidu de la perturbation se propage vers le chemin critique $Lp_3=(p_2, t_2, p_8, t_8)$.

La nouvelle stratégie consiste à injecter, par la commande, une avance de 2 sur le tir de la transition t_2 : $St_2(n)=St_{2e}(n)-2$. De cette façon, le jeton arrive à la place p_8 avec un retard de 5. La place p_8 offre une marge de rejet égale à 5 ($Cr(p_8)=5$), sachant qu'elle représente une machine en attente. En conclusion, la transition t_1 est alors tirée normalement.

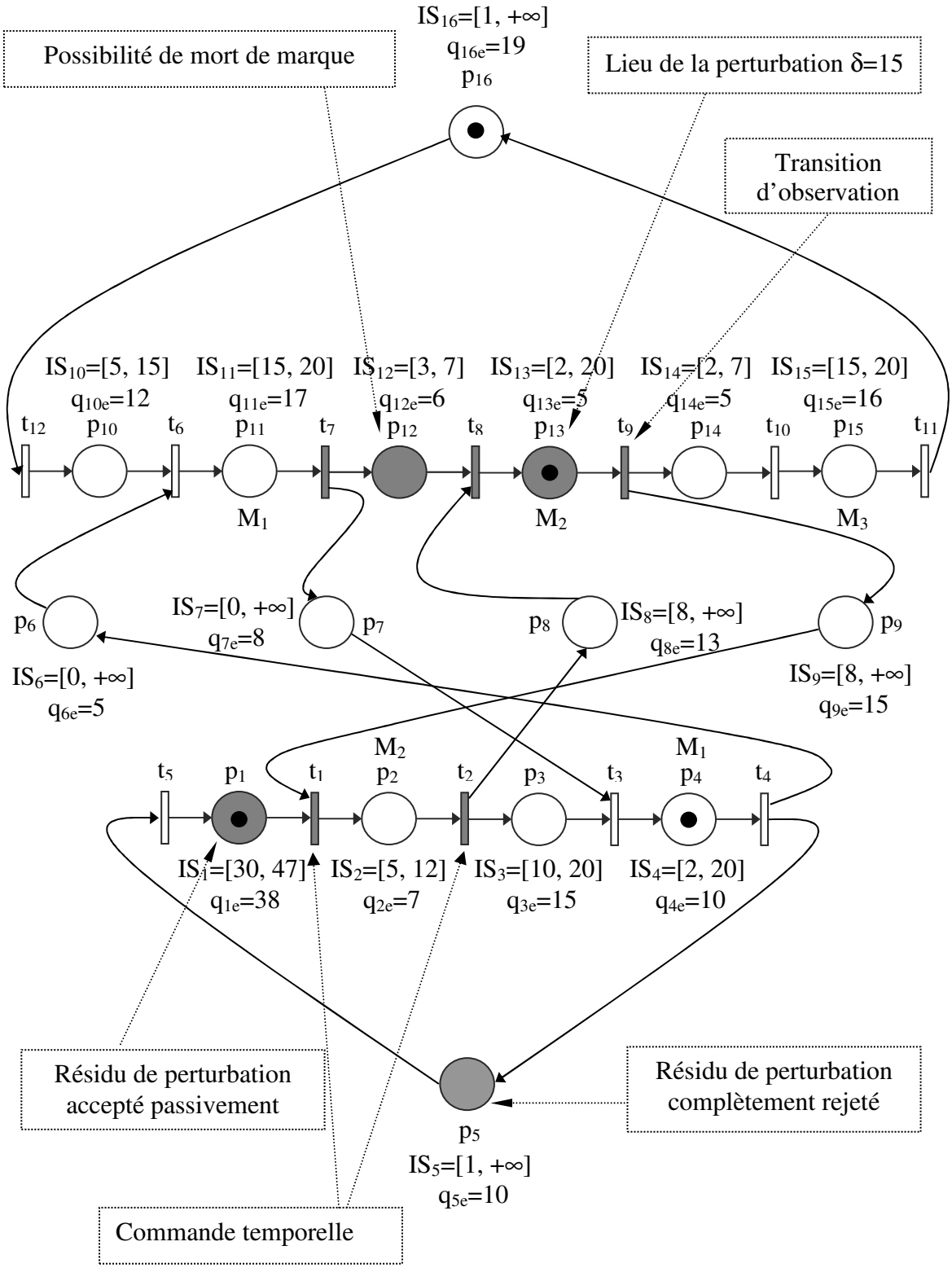


Figure III.10 : Exemple de propagation de la perturbation : application de la deuxième stratégie

C-2/ Application de la deuxième stratégie à un atelier de production laitière

Reprenons l'exemple de la figure III.11. Cette figure montre le RdP P-temporel ordonnancé modélisant le processus de fabrication considéré. Il s'agit d'un atelier à une gamme de production, caractérisé par un fonctionnement répétitif et avec postes d'assemblage.

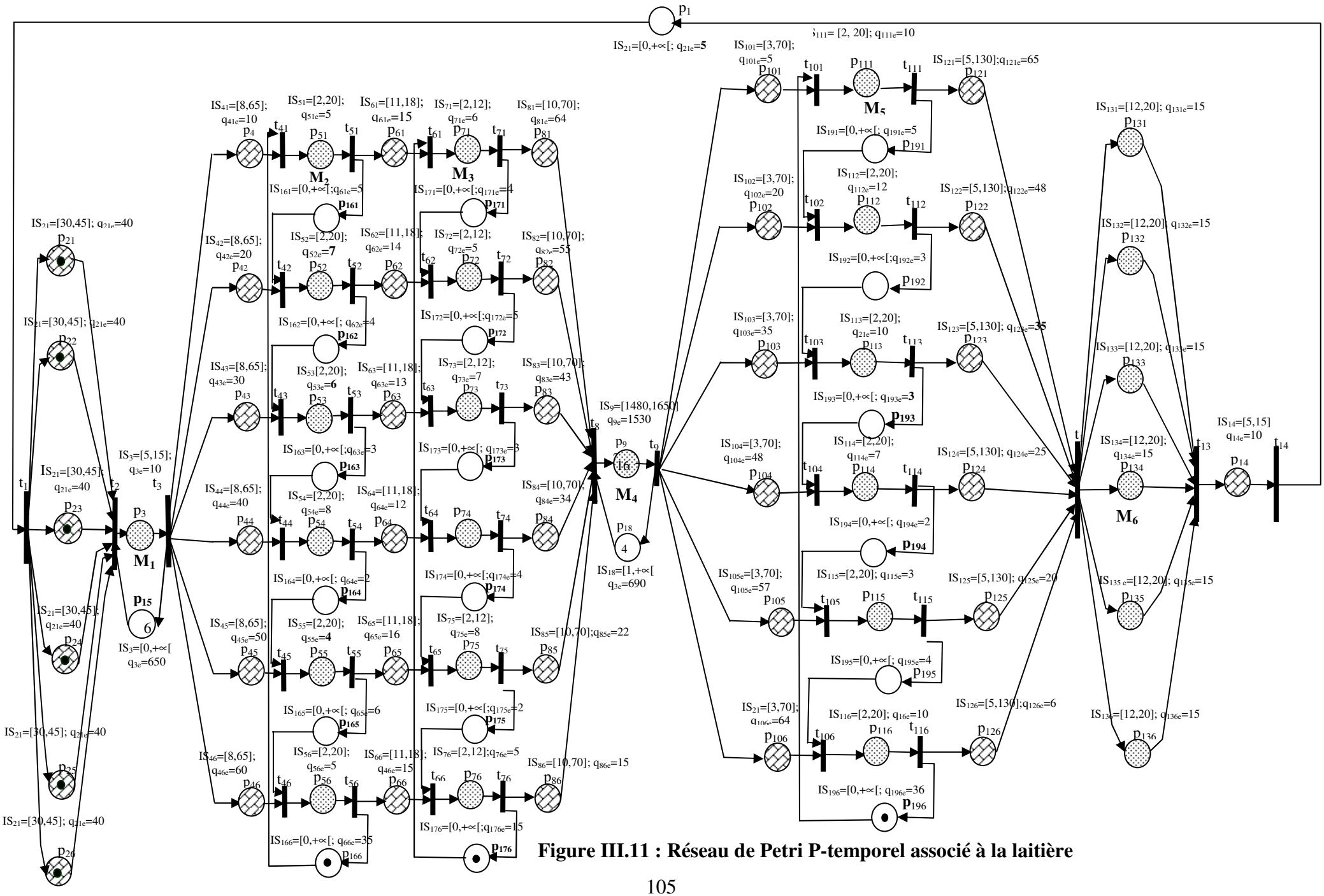


Figure III.11 : Réseau de Petri P-temporel associé à la laitière

Considérons une perturbation, δ=65 en p_9 (Hydromat), figure III.12, observée en t_9 et supposons que les transitions t_{101}, t_{111}, t_{102}, t_{112}, t_{103}, t_{113}, t_{104}, t_{114}, t_{105}, t_{115}, t_{106}, et t_{116} sont commandables [MHA, 10a]. Ces transitions, tableau III.3, constituent des sous chemins élémentaires localement commandables.

Tableau III.3: Marges disponible de commande à l'avance et au retard

Sous chemin monosynchronisé élémentaire	**f_a (p_i)**	**fr (p_i)**
$Lp_1=(p_9, t_9, p_{101}, t_{101})$	–2	65
$Lp_2=(p_9, t_9, p_{102}, t_{102})$	–5	50
$Lp_3=(p_9, t_9, p_{103}, t_{103})$	–3	35
$Lp_4=(p_9, t_9, p_{104}, t_{104})$	–3	22
$Lp_5=(p_9, t_9, p_{105}, t_{105})$	–2	13
$Lp_6=(p_9, t_9, p_{106}, t_{106})$	–4	6
$Lp_7=(p_{111}, t_{111}, p_{191}, t_{102})$	–5	50
$Lp_8=(p_{112}, t_{112}, p_{192}, t_{103})$	–3	35
$Lp_9=(p_{113}, t_{113}, p_{193}, t_{104})$	–3	22
$Lp_{10}=(p_{114}, t_{114}, p_{194}, t_{105})$	–2	13
$Lp_{11}=(p_{115}, t_{115}, p_{195}, t_{106})$	–4	6
$Lp_{12}=(p_{116}, t_{116}, p_{196}, t_{101})$	–2	65

La perturbation δ est propagée vers les chemins Lp_1, Lp_2, Lp_3, Lp_4, Lp_5, et Lp_6. Sur le chemin Lp_1 la perturbation provoque passivement le changement de l'instant de tir de t_9 et le changement du temps de séjour dans la place p_9: $St_9(n)=St_{9e}(n)+65$ et $q_9=q_{9e}+65=1595$. Une fois passé par t_9, la perturbation se propage vers le chemin critique $Lp_7=(p_{111}, t_{111}, p_{191}, t_{102})$.

Un jeton arrive en p_{101} avec un retard égal à 65. Ceci ne provoque pas de mort de marque en p_{196} puisque la marge de robustesse au retard en p_{196} est égale à $+\infty$ (machine en attente). Afin d'éviter la mort de marque au niveau de la transition t_{102}, la stratégie adopté consiste à injecter, par la commande, une avance de 2 sur le tir de la transition t_{101} : $St_{101}(n)=St_{101e}(n)-2$ et une avance sur le tir de la transition t_{111} ($St_{111}(n)=St_{111e}(n)-8$).De cette façon, le jeton arrive à la place p_{191} avec un retard de 50. La place p_{191} offre une marge de rejet égale à 5 ($Cr(Lp_7)=5$), sachant qu'elle représente une machine en attente. En conclusion, la transition t_{102} est alors tirée normalement.

Sur le chemin Lp_2, une partie de la perturbation est rejetée en p_{192} et le jeton perturbé est disponible en p_{102} avec un retard égal à 62 ($Cr(Lp_8)=3$). Sachant que la marge de retard disponible en p_{103} est égale à 35, une mort de marque en p_{103} est inévitable dans le cas de la robustesse passive. Si les transitions t_{102} et t_{112} sont commandables, elles constituent deux sous chemin localement commandable sur les plages [–17, 50] et [–10, 8] , De ce fait, la mort de marque en p_{102} est évitée.

Sur le chemin Lp_3, après le franchissement de la transition t_{103}, la perturbation est transmise δ=65 est transmise au chemin $Lp_9=(p_{113}, t_{113}, p_{193}, t_{104})$. Il est facile de vérifier que si les deux transitions t_{103} et t_{113} sont commandables respectivement sur les plages [–32, 35] et [–8, 10] la transition t_{104} est tirée normalement.

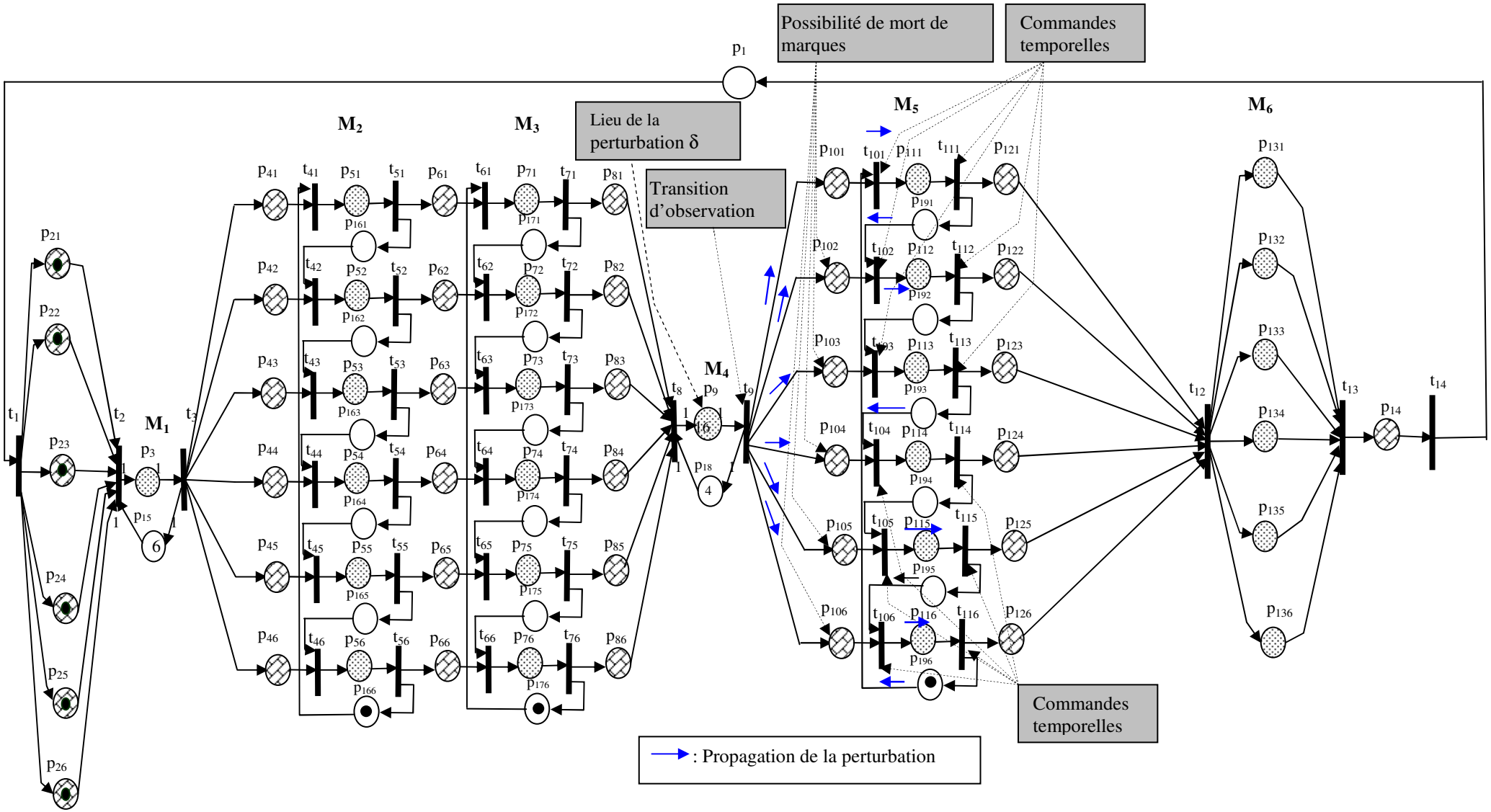


Figure III.12: Exemple de propagation de la perturbation : cas de la deuxième approche

Sur le chemin Lp_4 , en injectant par la commande, une avance de 45 u.t sur le tir de la transition t_{104} : $St_{104}(n)=St_{104e}(n)-45$ et une avance de 5u.t sur le tir de la transition t_{114} : $St_{114}(n)=St_{114e}(n)-5$. De cette façon, le jeton arrive à la place p_8 avec un retard de 15. La place p_{194} offre une marge de rejet égale à 2 (Cr (p_{194})=2), sachant qu'elle représente une machine en attente. En conclusion, la transition t_{105} est alors tirée normalement.

Sur les chemins Lp_5 et Lp_6, il est facile de vérifier que en posant que les transitions t_{105}, t_{115}, t_{106}, et t_{116} sont commandables respectivement sur [−54, 13], [−61, 6], [−1, 17] et [−8, 10] les morts de marques en p_{105} et p_{106} sont évitées.

Interprétation physique

Les bouteilles sortent de l'Hydromat (place p_9) sur un convoyeur (représenté par les places p_{101}, p_{102}, p_{103}, p_{104}, p_{105} et p_{106}) et se dirigent vers l'étiqueteuse (représentée par les places p_{111}, p_{112}, p_{113}, p_{114}, p_{115} et p_{116}) emportées par ce convoyeur (voir figure III.13) [MHA, 10a].

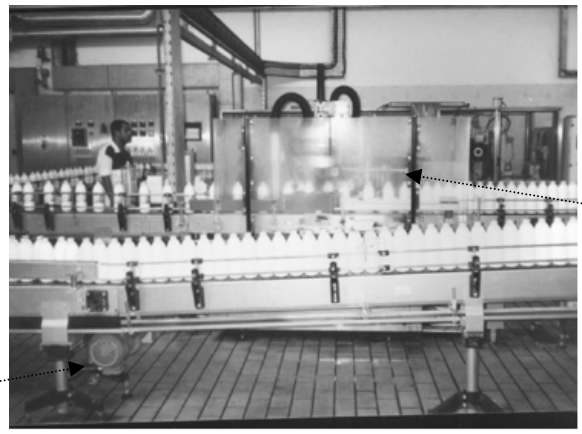


Figure III.13 : Convoyeur amenant les bouteilles de l'Hydromat vers l'étiqueteuse

Les bouteilles arrivent devant l'étiqueteuse pour être prises par l'étoile d'entrée, figure III.14. Cette étoile est équipée d'un variateur de vitesse qui permet soit d'accélérer ou de ralentir le passage des bouteilles au niveau de l'étiqueteuse afin d'éviter un cumul des bouteilles à la sortie de l'Hydromat. Si on a un cumul des bouteilles à la sortie de l'hydromat, on doit varier la vitesse de rotation de l'étoile d'entrée en agissant sur les transitions t_{101}, t_{111}, t_{102}, t_{112}, t_{103}, t_{113} et t_{104}).

Après une rotation des récipients de 90°, les brosses, chargées de mettre de la colle, et les rouleaux d'éponges, chargés de presser sur les étiquettes, assurent un positionnement précis de l'étiquette. Ensuite, l'étoile de sortie prend les récipients et les transfère de nouveau sur un autre convoyeur : en effet l'étoile de sortie joue le même rôle que celle d'entrée. Afin de rattraper ce retard, on agit sur un ensemble des transitions commandables (t_{114}, t_{105}, t_{115}, t_{106} et t_{116}), ce qui nous permet de compenser la perturbation en augmentant la vitesse de rotation de l'étoile de sortie.

En conclusion, si la perturbation est de type retard, en appliquant la deuxième approche (rejet du perturbation dés son observation) et en agissant sur l'ensemble des étoiles d'entrée et de sortie (qui se traduit par une génération des avances sur les tirs des transitions

commandables des chemins de propagation de la perturbation), on pourra rejeter la perturbation.

Figure III.14 : Etiqueteuse équipée d'une étoile d'entrée et de sortie [MHA, 10a]

III.3.3.1.4 Troisième approche : Approche Mixte

A/ Principe

La troisième approche proposée est une approche mixte consistant à combiner les deux précédentes. Dès la détection d'une perturbation, on essaye de la rejeter sur les chemins de propagation. Si cela n'est pas suffisant pour éviter la mort de marque au niveau d'une transition de synchronisation, on pose le problème de commandabilité sur les chemins parallèles qui mènent à cette dernière. On cherche alors à générer un décalage temporel de même nature que la perturbation afin d'éviter la mort de marque prévue.

Lemme 5

Soient :

- $m \in T_S$,
- p_j : la place par laquelle l'impact de la commande arrive à la transition m (p°_j=m et p_j=OUT(Lp_k)°),
- Lp_c : un chemin monosynchronisé localement commandable sur $[\Delta_{min}, \Delta_{max}]$.

Si on adopte une stratégie mixte de commande robuste face aux perturbations temporelles (combinaison des deux approches de rejet de perturbation) :

$$\delta_c = \max[0, \delta - \min(Cr(Lp_i)) + \Delta_{min}(Lp_c) - (b_j - q_{je})]$$
$$Lp_i \in EC(h, m)$$

$$\text{Avec: } \Delta_{min}(Lp_c) = \sum_{(p^\circ_k \in T_C) \wedge (p_k \in Lp_c)} fa(p_k) \quad .$$

Preuve

Prenons l'exemple de la figure III.15

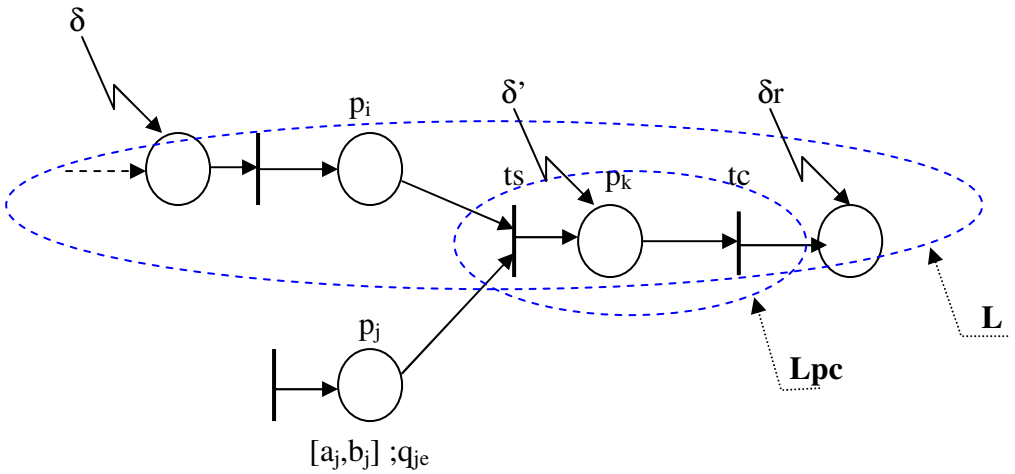


Figure III.15 : Exemple de propagation des perturbations : cas d'une approche mixte

Soient

Lp_k un chemin monosynchronisé
$L = \bigcup_i Lp_i$ ($OUT(L)=OUT(Lp_i)$) et soit δ une perturbation temporelle au retard à l'entrée de ce chemin ($\delta > 0$).

La perturbation δ se propage le long du chemin L et l'expression de la perturbation δ_c s'écrit sous la forme :

$$\delta_c = \max[0, \delta - \min_{Lp_i \in EC(h,m)}(Cr(Lp_i)) - (b_j - q_{je})]$$

D'après le théorème 1, si le chemin Lp_c est localement commandable sur la plage $[\Delta_{min}, \Delta_{max}]$ tel que $-\Delta_{min} \geq \delta$, la perturbation δ' peut être rejetée localement, par la commande, par Lp et on obtiendra un résidu de perturbation

$$\delta_r = \delta' + \Delta_{min}(Lp_c) = \delta - \min_{Lp_i \in EC(h,m)}(Cr(Lp_i)) + \Delta_{min}(Lp_c)$$

Et par suite, l'expression du la perturbation de commande δ_c s'écrit :

$$\delta_c = \max[0, \delta - \min_{Lp_i \in EC(h,m)}(Cr(Lp_i)) + \Delta_{min}(Lp_c) - (b_j - q_{je})]$$

B/ Algorithme

L'algorithme proposé est une combinaison des deux algorithmes présentés dans la section précédente.

Soient

- une perturbation temporelle au retard en p_i (nœud n) , observé en une transition t ($t \in To$)
- $Cr(Lp_j)$: la capacité de rejet temporel passif à un retard d'un sous chemin monosynchronisé Lp_j.
- $\delta_c \in [\Delta_{min}, \Delta_{max}]$

$\varphi = \{Lp_j / (n° = IN(Lp_j)) \wedge (Lp_j \in C_{ms}) \wedge (Lp_j \in G)\}$

$$\text{Marge} \Leftarrow \min_j [Cr(Lp_j) + \sum_i \Big(b_i - q_{ie} \Big)_{p_i \in T_c \cap (R_u \cup Trans_c)} + F(G \backslash Lp_j, OUT(Lp_j)°, \min (b_i - q_{ie}) + \delta_C)]_{\substack{p^o_i = OUT(Lp_j) \\ p^o_i \notin Lp_j}}$$

F(G*, p*, Δrt)
{
$\varphi^* = \{Lp_j / (p^* \in Lp_j) \wedge (Lp_j \in C_{se}) \wedge (Lp_j \in G^*)\}$
Si ($\varphi^* == \Phi$ ou $\Delta rt == 0$) alors ($F \Leftarrow \Delta rt$)

Si non
{

$$F \Leftarrow \min_j \{\min[\Delta rt, (Cr(Lp_j) + \sum_i \Big(b_i - q_{ie} \Big)_{p_i \in T_c \cap (R_u \cup Trans_c)} + F(G^* \backslash Lp_j, OUT(Lp_j)°, \min (b_i - q_{ie}) + \delta_C)]\}_{\substack{p^o_i = OUT(Lp_j) \wedge p^o_i \notin Lp_j \\ \wedge\ p_i \in T_c \cap (R_u \cup Trans_c)}}$$

}
}

Description de l'Algorithme

Soit

- Lp un chemin localement commandable sur la plage $[\Delta_{min}, \Delta_{max}]$ avec :

  $$\Delta_{min} = \max_{p°_i = t}(f_a(p_i)) \quad ; \quad \Delta_{max} = \min_{p°_i = t}(f_r(p_i))$$

- $\delta' = \delta - Cr(Lp)$
  avec :
  δ : Une perturbation temporelle au retard d'un chemin mono synchronisé.
  δ' : Résidu de la perturbation
- $t \in T_C$ (t constitue un sous chemin élémentaire localement commandable sur la plage $[\max_{p^o_i = t}(f_a(p_i)), \min_{p^o_i = t}(f_r(p_i))]$)

Si
$-\Delta_{min} \geq \delta'$ et $\delta'>0$ (la perturbation δ' peut être rejetée localement, par la commande, par Lp).

Si non
$\Rightarrow$ Appel de l'algorithme de génération par la commande d'un décalage temporel de même nature que la perturbation

C/ Application de la troisième stratégie à un atelier multi-produits

Soit δ=9 une perturbation temporelle au retard affectant le tir de la transition de synchronisation t_1 (figure III.16).

Le temps de séjour réel du jeton dans la place p_1 est alors égal à $q_1=q_{1e}+9=47$. Par conséquent, il n'y a pas de mort de marque en p_1 (IS_1= [30, 47]) ni en p_9, place représentant une machine en attente.

La perturbation se propage vers les deux chemins $Lp_3=(p_2, t_2, p_8, t_8)$ et $Lp_4=(p_2, t_2, p_3, t_3)$. Une partie de la perturbation est rejetée en p_8 et le jeton perturbé est disponible en p_8 avec un retard égal à 4 ($Cr(Lp_3)=5$). Sachant que la marge de retard disponible en p_{12} est égale à 1, une mort de marque en p_{12} est inévitable dans le cas de la robustesse passive.

Supposons que les transitions t_2 et t_7 sont commandables. Elles constituent alors deux sous chemins élémentaires localement commandables respectivement sur les plages [−2, 5] et [−2, 3], selon la définition III.15.

La stratégie mixte consiste, en première phase, à rejeter une partie de la perturbation au niveau de la transition t_2 en la tirant en avance de 2 u.t.. Puis, en deuxième phase, à retarder le tir de la transition t_7 de 1 u.t., ce qui permet d'éviter la mort en p_{12}.

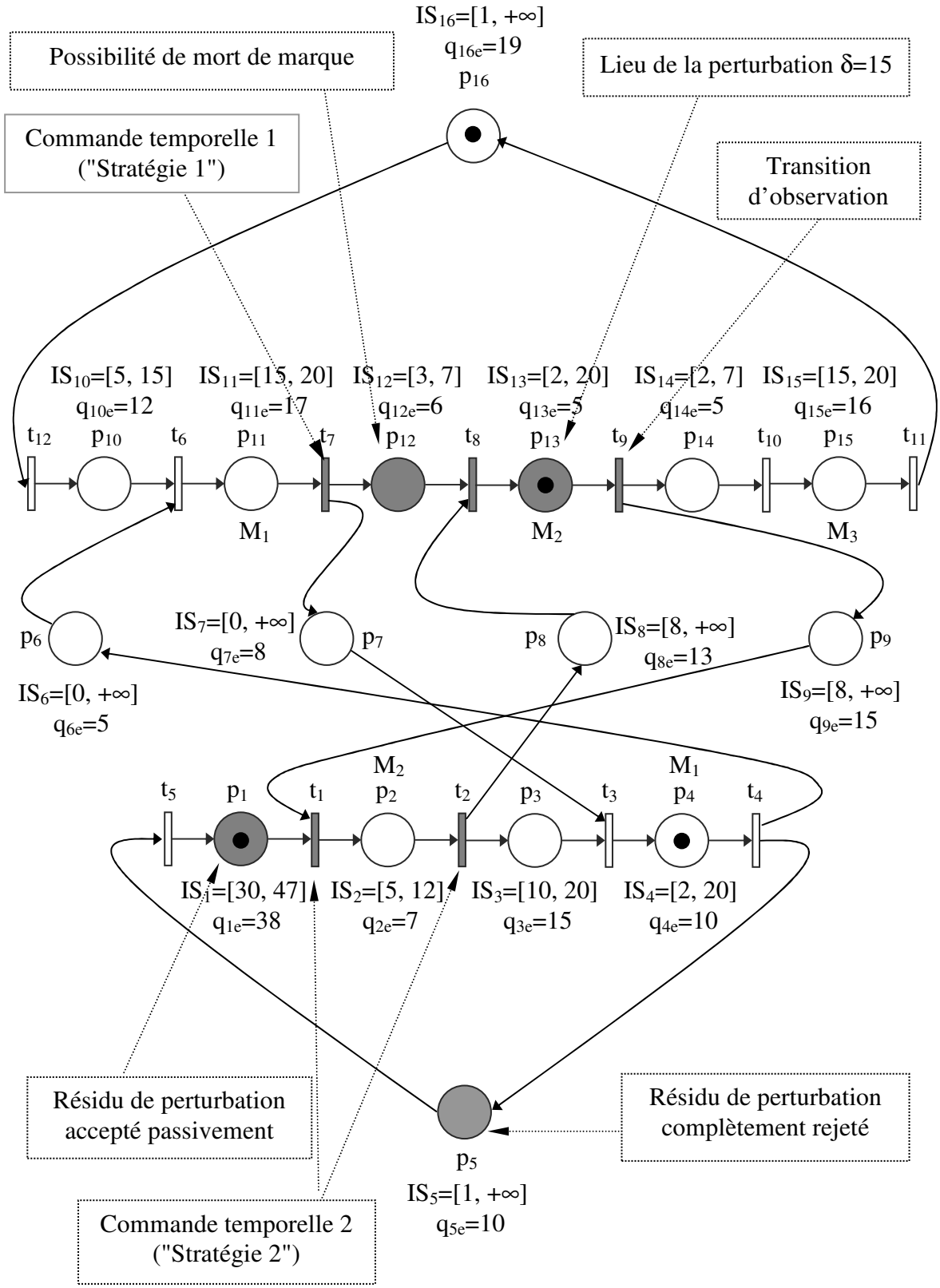


Figure III.16 : Exemple de propagation de la perturbation : application de la troisième stratégie

III.3.3.2 Conclusion

Nous avons présenté dans cette section trois stratégies de commande robuste face aux perturbations temporelles. La première consiste à générer par la commande un décalage temporel de même nature que la perturbation afin d'éviter la mort de marques aux niveaux des transitions de synchronisation du modèle RdP P-temporel.

La deuxième se propose de rejeter la perturbation dès son observation en jouant sur la commande. La troisième est une combinaison des deux précédentes.

La contribution de cette partie est constituée par des apports méthodologiques en vue de la synthèse d'une commande étendant la plage de robustesse. A partir des approches développés théorème énoncé, nous voyons bien la manière avec laquelle est transmis de proche en proche un problème d'évitement de mort de marque, afin de se situer dans une plage de robustesse passive.

III.4 Conclusion

La robustesse passive caractérise la faculté du système à maintenir les qualités spécifiées pour les sorties sans qu'aucune nouvelle action spécifique ne soit mise en œuvre. Une caractérisation analytique de cette propriété a tout d'abord été établie localement. Puis un algorithme de calcul a permis de construire une borne supérieure à sa valeur en un nœud.

La robustesse active quant à elle s'appuie sur le contrôle des instants de tirs des transitions. Cette commande temporelle permet, dans certains cas, d'éviter cette mort de marque. L'application des trois approches à un atelier multi-produits montre que la troisième approche est la plus efficace puisque elle offre plus de marge de réaction face aux perturbations temporelles que les deux autres approches.

Une validation sur un atelier pilote (atelier de production laitière) montre l'efficacité industrielle de la commande. L'application industrielle montre que la deuxième et la troisième approche sont les plus appropriées. En effet, la première approche n'a pas pu être appliquée à notre atelier puisque il n'y a pas de parallélisme réel sur la laiterie (atelier à une seule gamme de production avec postes d'assemblage). Enfin, la première approche conserve de toute façon l'inconvénient de transmettre les perturbations temporelles aux entités qui sont en aval du système perturbé.

CHAPITRE IV :

Surveillance des Ateliers à Contraintes de Temps

Chapitre IV

Surveillance des Ateliers à Contraintes de Temps

IV.1 Introduction

Le précédent chapitre a été consacré à l'étude des différentes caractéristiques de robustesse pour les ateliers à contraintes de temps. Le présent chapitre s'intéresse aux possibilités concrètes d'utilisation qui découlent de l'existence des propriétés de robustesse. Une attention particulière sera portée à la supervision de la qualité des produits, mais aussi au contrôle de l'état de l'outil de production.

Une autre particularité, induite par la volonté de mise en œuvre effective, est la gestion de la notion d'incertitude. Cette dernière existe bel et bien dans les ateliers réels et se matérialise sous des formes diverses : limite de répétabilité des robots, jeux mécaniques dans les systèmes de transitique et autres variations temporelles générées par les asservissements sur un paramètre pour lequel il existe une dispersion de qualité sur les produits à l'entrée de l'atelier. Ainsi, il est illusoire d'attendre une qualité rigoureusement identique pour un paramètre critique sur un produit semi-fini fourni par une dizaine de sous-traitants différents. Les asservissements vont donc lisser cette diversité en utilisant notamment la variation des temps opératoires. Une proposition faite dans ce chapitre est l'utilisation d'une modélisation floue de cette incertitude. Cette technique permet d'intégrer ce défaut de précision dans les couches de supervision.

Ce chapitre est organisé en trois grandes parties. Les premiers efforts introduisent l'incertitude dans les durées opératoires des ateliers manufacturiers à contraintes de temps ainsi qu'une classification des perturbations.

La deuxième section s'intéresse à l'intégration des résultats concernant la robustesse dans la génération des symptômes et la classification des comptes-rendus des différentes actions. Une technique de filtrage par logique floue est proposée.

La troisième section de ce chapitre propose d'apporter sa contribution au domaine de la surveillance en temps réel des ateliers manufacturiers à contraintes de temps. Dans l'objectif d'améliorer la qualité de production, nous nous proposons de développer une nouvelle structure de surveillance, capable de réagir à différentes situations. Notre solution, au niveau de la détection des défaillances, est basée sur la reconnaissance en ligne, et de manière distribuée, des évolutions spécifiques du système surveillé. Ces évolutions sont représentées par des chroniques, qui sont définies par un ensemble d'événements et de contraintes temporelles reliant ces événements. La fonction diagnostic qui consiste à la localisation, et l'identification de la défaillance est assurée par les arbres de défaillances flous.

IV.2 Représentation des incertitudes dans les ateliers manufacturiers à contraintes de temps

IV.2.1 Incertitudes et perturbations dans les ateliers manufacturiers

IV.2.1.1 Incertitude dans les ateliers manufacturiers

Selon Artigues [ART, 02], la classification des perturbations dépend du niveau de connaissance de l'incertitude. Ils identifient trois types d'incertitudes dans les environnements manufacturiers :

- Des incertitudes complètement inconnues, ou bien aléas imprévisibles, qui sont des évènements imprévus pour lesquels aucune information n'est disponible à l'avance, par exemple, une grève ou un accident dans le lieu de travail ou une absence inopinée d'un ouvrier, etc. Dans ce cas, il est impossible d'en tenir compte dans la phase de pré-calcul d'un ordonnancement prédictif initial.

- Des suspicions du futur qui sont données grâce à l'intuition et l'expérience du décideur. Ce sont des incertitudes difficilement quantifiables et par conséquent il est difficile de les intégrer dans des algorithmes d'ordonnancement. Des systèmes d'aide à la décision interactifs sont plus appropriés pour ce type d'incertitudes.

- Des incertitudes partiellement connues, ou bien aléas prévisibles, dont quelques informations sont disponibles avant l'exécution. Par exemple, on connaît le type de perturbations qui peuvent arriver (pannes machines, arrivée des tâches en retard, etc.). Plus d'informations peuvent être déduites grâce à l'historique de l'atelier, comme par exemple, les lois de distribution de la fréquence d'occurrence et de la durée des pannes. Ces informations peuvent être incluses lors du calcul d'une solution initiale au problème considéré.

IV.2.1.2 Classification des incertitudes

Mehta [MEH, 99] ainsi que Cowling [COW, 02] ont considéré essentiellement deux classes d'incertitudes : celles liés aux ressources et celles liés aux opérations ou travaux. C'est cette classification que nous avons adoptée pour la suite de ce travail, et que nous définissons dans la section suivante.

IV.2.1.2.1 Perturbations sur les ressources

Les perturbations prises en compte dans cette catégorie sont :

- Les pannes machines : elles peuvent suivre des lois de probabilité ou être complètement aléatoires. On peut inclure aussi, dans cette catégorie, le facteur humain, l'opérateur travaillant sur la machine (i.e. on peut considérer l'indisponibilité d'un ou de plusieurs opérateurs comme une panne machine, car la machine commandée par cet opérateur est indisponible).

- Le changement de ressources : il concerne la modification dans les matières premières pour la fabrication d'un produit ou le changement d'un ou plusieurs outils d'une

machine et ceci dans le but d'accomplir une autre tâche par la même machine ne pouvant s'effectuer avec le même outil [MIG, 95], [LAW, 97].

- Le manque de ressources : il concerne soit le manque de matières premières ou d'outils de fabrication. Ce type de perturbation est rencontré dans les ateliers ne disposant pas de stock, ou les ateliers n'ayant pas une livraison adéquate et régulière [LAW, 97].

IV.2.1.2.2 Perturbations sur les opérations

Parmi les perturbations les plus fréquentes et les plus étudiées, on peut trouver [SIT, 05]:

- La charge d'un atelier : on désigne par cette notion le degré de liberté d'exécution de chaque tâche dans l'atelier. On dit qu'un atelier est chargé si la tâche n'a pas beaucoup de liberté d'exécution (i.e. les dates de début et de fin d'exécution coïncident ou il n'y a pas un grand écart avec les dates de début d'exécution au plus tôt et de fin d'exécution au plus tard respectivement).

- La modification d'un travail : en général, cette modification concerne le changement dans les durées opératoires des différentes tâches d'un travail ou d'un ensemble de travaux (élargissement ou rétrécissement de la durée opératoire) [LAW, 97].

  Ce changement est dû à plusieurs facteurs dont on peut citer l'état de la machine, pouvant influencer sur tous les produits passant sur cette dernière. Si la machine est âgée ou n'est pas dans un bon état. Les opérations effectuées sur cette dernière seront prolongées avec un certain degré. Dans ce cas, on dit que le changement est lié aux machines. Ce changement peut être lié au travail lui-même ; on peut décider par exemple que les durées opératoires de certaines tâches seront rétrécies ou élargies ; cela est dû à l'importance de la qualité des produits concernés par le rétrécissement/élargissement de leurs durées de fabrication.

L'ensemble des auteurs, qui ont traité les incertitudes, ont étudié principalement deux perturbations: perturbations sur les équipements et plus particulièrement les pannes machine ou encore les perturbations concernant les travaux et plus particulièrement le changement dans les durées opératoires [SIT, 05]. La section qui suit, concerne ces deux types de perturbation.

IV.2.2 Représentation des incertitudes dans les ateliers manufacturiers

La production est sujette à de nombreuses incertitudes découlant des procédés, des opérateurs ou de la variation de qualité des produits. Il est entendu qu'une production est rarement parfaitement répétitive, à cause d'incertitudes sur le procédé et surtout sur la consigne. Cependant, une production régulière est nécessaire au bon déroulement des opérations de contrôle de qualité et de calibrage.

Pour toutes ces raisons, une fonction de possibilités, figure IV.1, représentant l'incertitude sur le temps de séjour effectif (q_i) d'un jeton dans une place p_i, est proposée. Cette fonction permet de mettre en évidence des zones de certitude pour une durée opératoire.

Le temps de séjour instantané (q_i) peut être différent du temps de séjour prévu q_{ie}, suite à une perturbation temporelle ou bien suite à une modification des instants de tir des

transitions par la commande dans le but de compenser une perturbation.

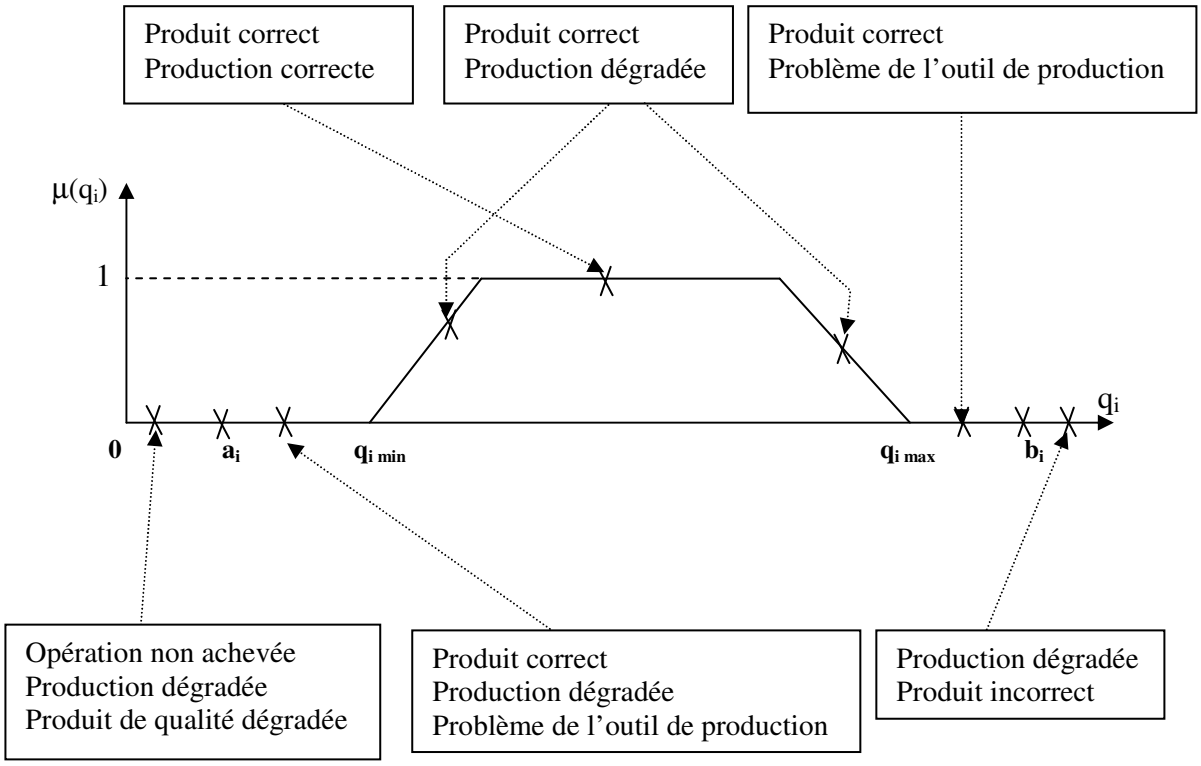


Figure IV.1 : Fonction de possibilité associée à un temps de séjour effectif q_i

La figure IV.1, présente un modèle flou du fonctionnement normal. Suivant le temps de séjour d'une marque dans une place p_i, trois cas peuvent être distingués :

– **1er cas : $q_i \in [q_{i\ min}, q_{i\ max}]$**

De point de vue modélisation, un jeton appartenant à l'intervalle $[q_{i\ min}, q_{i\ max}]$, est disponible ; il participe donc à la validation des transitions de sortie de la place qui le contient (figure IV.2). Cela se traduit par un produit fabriqué de qualité correcte. Une valeur de possibilité élevée garantit un produit de qualité. Au contraire, une faible valeur de possibilité implique une production dégradée mais le produit est qualifié de qualité.

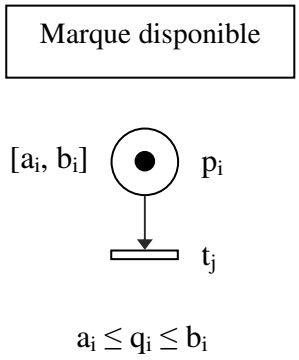


Figure IV.2 : État d'un jeton dans un RdP P-temporel

– **2^{éme} cas : $q_i \in [a_i, q_{i\ min}[\cup]q_{i\ max}, b_i]$**

Si le temps de séjour du jeton dans une place p_i est inclus dans le domaine $[a_i, q_{i\ min}[\cup]q_{i\ max}, b_i]$, une marque dans une place p_i participe, dans ce cas, à la validation de ses transitions de sortie puisque elle séjourne au moins une durée a_i dans cette place. Elle doit quitter la place p_i, donc franchir l'une des transitions de sortie au plus tard quand sa durée de séjour devient égale à b_i. Cela signifie que le produit est correct, mais on a un problème au niveau de l'outil de production. Deux cas peuvent être distingués :

- produit en avance ($q_i \in [a_i, q_{i\ min}[$)
- produit en retard ($q_i \in]q_{i\ max}, b_i]$)

Dans les deux cas, la production est maintenue tout en la qualifiant de «production dégradée». Bien entendu, le produit n'est pas dégradé, mais l'activité qui consiste à produire est qualifiée comme telle, les instants de livraisons des produits n'étant pas ceux qui étaient prévus initialement. Si la production est qualifiée de dégradée, cela signifie qu'on a un problème au niveau de l'outil de production qui se manifeste au niveau du RdP P-temporel par un retard (resp. une avance) du temps de séjour du jeton dans une place p_i.

Dans ce cas de figure, on peut conclure :

- qu'il n'y a pas d'alarme sur la qualité de produit (produit correct)
- qu'il' y a une alarme de maintenance : tout retard ou avance du temps de séjour q_i implique une défaillance technique de l'outil de production, nécessitant de générer une action de maintenance.

– **3^{éme} cas : $q_i \notin [a_i, b_i]$**

Si le temps de séjour effectif d'un jeton dans une place p_i n'appartient pas à l'intervalle $[a_i, b_i]$, deux cas peuvent être distingués :

- $q_i < a_i$: si le temps accordé à une opération est inférieur à la borne inf (figure IV.3a), cela signifie que l'opération est non achevée (produit incorrect et problème au niveau de l'outil de production). Prenons l'exemple de l'hydromat : si le temps de stérilisation du lait est inférieur au temps min cela signifie que le lait est non stérilisé (lait pas assez cuit) et par suite le produit n'est pas consommable,
- $q_i > b_i$: la borne supérieure est dépassée. On a dans ce cas, figure IV.3b, une altération de la qualité du produit (produit de qualité dégradée) et un problème au niveau de l'outil de production. Pour l'exemple de l'hydromat, si on dépasse le temps max de stérilisation (lait trop cuit), le produit est donc incorrecte (produit à jeter).

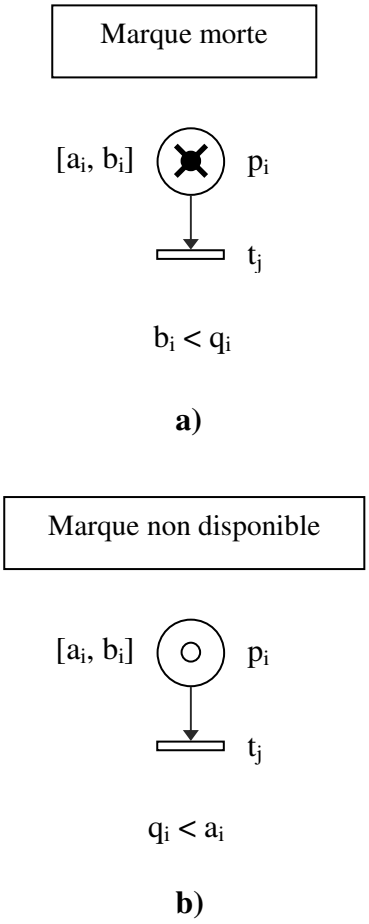


Figure IV.3 : Différents états d'un jeton dans un RdP P-temporel

Les ateliers étudiés sont caractérisés par des contraintes temporelles associées qui doivent être impérativement respectées. Toute détection d'une violation des contraintes d'intervalles associées aux différentes opérations entraînera automatiquement un arrêt de la production. Par contre, lorsqu'on reste dans les domaines de robustesse du système il est prouvé que ce type de violation n'a pas lieu. Nous envisageons, dans ce cas, de maintenir la production tout en la qualifiant de «production dégradée». C'est dans ce contexte que nous proposons d'intégrer la robustesse dans la génération de symptômes telle qu'elle a été présentée dans la thèse de A. Toguyeni [TOG, 92] et N. Jerbi [JER, 06f].

IV.3 Intégration de la robustesse dans le filtrage des comptes-rendus

IV.3.1 Introduction

La détection des symptômes de défaillance liés aux éléments du procédé requiert généralement l'élaboration d'un modèle du système à surveiller (procédé). Ce modèle peut être un modèle de bon fonctionnement ou un modèle de dysfonctionnement. Par exemple, dans le cas de systèmes discrets, un modèle peut correspondre à un RdP, et dans le cas de systèmes continus, à un ensemble d'équations différentielles.

Dans le cas où un modèle est utilisé, deux mécanismes de base sont utilisés pour la détection. Le premier consiste à comparer les évolutions du système observé avec celles d'un modèle du procédé ou de signatures (séquences datées d'événements) de bon fonctionnement

qui évoluent de façon synchrone, c'est-à-dire en temps réel avec le système. Ce modèle est intégré dans le système de commande-surveillance. Le second consiste à rechercher des signatures connues de défaillances [BOU, 04]. Ces signatures décrivent des défaillances passées ou théoriques connues du procédé ou d'éléments du procédé. Sans modèle du système à surveiller, la stratégie adoptée consiste en l'exploitation des informations données par les capteurs et les détecteurs au niveau local du procédé [BOU, 05].

Parfois, dans les ateliers manufacturiers à contraintes de temps, l'information fournie par les capteurs est douteuse et les symptômes générés sont vagues. En outre, l'intervalle de validation associé aux comptes-rendus issus des capteurs, n'est pas toujours exact ; ceci se manifeste par des fenêtres temporelles mal définies. Ces raisons nous amènent à intégrer la logique floue dans le filtrage des comptes-rendus, telle qu'elle a été présentée dans les travaux de Jerbi [JER, 06c] [JER, 06e], [JER, 06f].

Cette section est une extension du travail de Jerbi [JER, 06c]. Dans [JER, 06c], une intégration de la robustesse dans le mécanisme de filtrage des comptes-rendus est proposée. Ce mécanisme, présenté par Toguyeni en 1992, vise à produire des symptômes pour le diagnostic [TOG, 92].

La première partie du chapitre récapitule le mécanisme de filtrage permettant l'intégration des résultats concernant la robustesse dans la génération de symptômes et la classification des comptes-rendus des différentes actions ; une description plus détaillée de cette approche est donnée dans [JER, 06c] et [TOG, 92]. La deuxième partie présente une nouvelle approche de filtrage floue où la logique floue et les techniques de filtrage des comptes-rendus sont intégrés. Afin de montrer l'efficacité de cette approche, dans la troisième partie, un exemple d'illustration est considéré et les résultats correspondants sont discutés.

IV.3.2 Intégration de la robustesse dans le filtrage des comptes-rendus

IV.3.2.1 Génération de symptômes

L'idée consiste à modéliser toute opération à partir d'une approche temporelle. A toute opération A_i, à laquelle est associée un compte-rendu CR_i, est associée une fenêtre temporelle $[\Delta t_{m/CRi}, \Delta t_{M/CRi}[$ (Figure IV.4). CR_i est valide uniquement à l'intérieur de cette fenêtre. $\Delta t_{m/CRi}$ et $\Delta t_{M/CRi}$ sont les instants relatifs de déclenchement de A_i (Start-Event). Le principe du filtrage est de positionner la fenêtre temporelle de chaque CR_i lorsque l'on a reçu son Start-Event. Deux types de symptômes sont distingués [TOG, 92] :

- Les symptômes de type I notés S_i^1 : cette classe de symptômes correspond à un compte-rendu attendu et non reçu à $\Delta t_{M/CRi}$, date donnée par rapport à l'occurrence du Start-Event A_i. Le mécanisme de détection de ce type de symptôme correspond au mécanisme classique de chien de garde, mais mis en œuvre de manière séparée de la commande.
- Les symptômes de type II notés S_i^2 : correspondent à des comptes-rendus intempestifs. Deux cas sont envisagés. Le premier correspond à une action et un compte-rendu survenant avant l'intervalle de validation. Le deuxième cas correspond à l'occurrence d'un compte-rendu en absence de toute commande pouvant la créer.

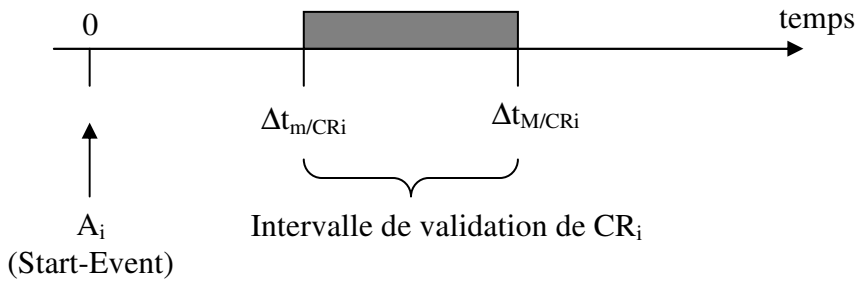


Figure. IV.4 : Modèle associé à une opération

IV.3.2.2 Intégration de la robustesse

Dans le cadre de l'intégration de la robustesse dans la supervision de systèmes manufacturiers à contraintes de temps, figure IV.5 [JER, 06e], cinq intervalles de temps sont définis, à savoir :
$I_{1i}=[\Delta t_{m''/CRi}, \Delta t_{m'/CRi}[$, $I_{2i}=[\Delta t_{m'/CRi}, \Delta t_{m/CRi}[$, $I_{3i}=[\Delta t_{m/CRi}, \Delta t_{M/CRi}[$, $I_{4i}=[\Delta t_{M/CRi}, \Delta t_{M'/CRi}[$ et $I_{5i}=[\Delta t_{M'/CRi}, \Delta t_{M''/CRi}[$.

La marge de robustesse passive disponible est dans $I_{2i} \cup I_{4i}$, alors que la marge de robustesse active est dans $I_{1i} \cup I_{5i}$. D'un point de vue fonctionnel, il y a trois plages d'utilisation dont on peut prouver la validité : le fonctionnement normal, la plage de robustesse passive et la plage de robustesse active. Dans le cas d'un fonctionnement anormal, on a toujours dualité des scénarios d'avance et de retard.

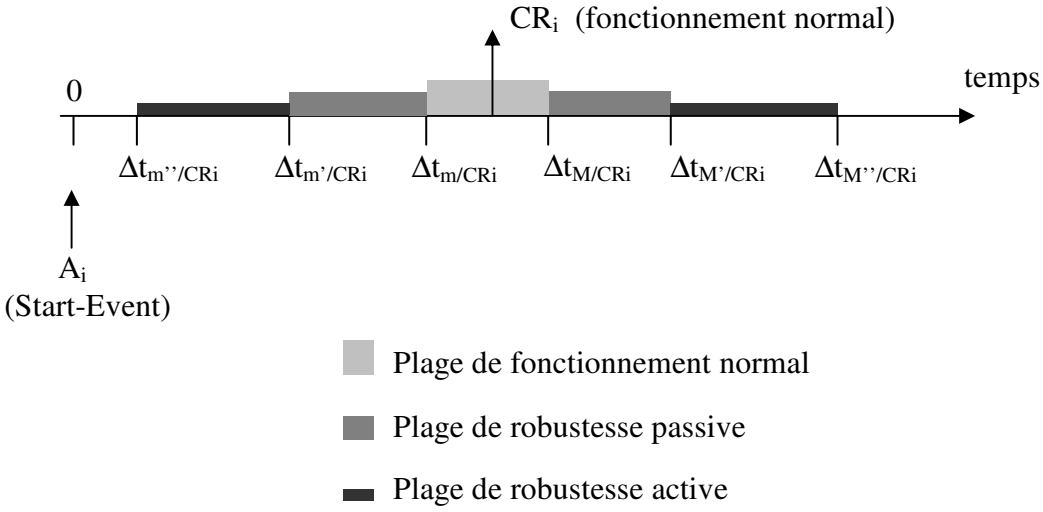


Figure IV.5 : Intégration de la robustesse dans le modèle associé à une opération [JER, 06c]

Les hypothèses formulées dans [JER, 06e] sont restrictives. Il est naturel d'envisager des scénarios où les spécifications temporelles du procédé n'ont pas été remplies, mais la production peut néanmoins continuer. Il faudrait alors introduire une classification plus fine des types de pannes et de leurs impacts sur les systèmes considérés.

La section suivante présente un mécanisme de filtrage flou des comptes-rendus, qui introduit une classification plus fine du fonctionnement anormal et intègre la connaissance vague de l'intervalle de robustesse dans l'interprétation des comptes-rendus, en provenance de l'atelier, pour la génération des symptômes. L'objectif est d'éviter le gel de commande lorsque les perturbations temporelles sont incluses dans les intervalles de robustesse.

IV.3.3 Robustesse et filtrage flou des comptes-rendus

Afin d'introduire les concepts nécessaires à notre étude, nous présentons quelques éléments de logique floue nécessaires à la compréhension de notre approche afin de réaliser un filtrage floue des comptes-rendus.

IV.3.3.1 Généralités sur la logique floue

Les ensembles flous, introduits par Zadeh en 1965, sont des classes d'éléments décrits par des connaissances incertaines ou imprécises. La représentation et la mise en œuvre de connaissances vagues, imprécises et/ou incertaines par la théorie des ensembles flous, sont connues sous le nom de raisonnement approché [ZAD, 89]. Ce raisonnement trouve ses bases formelles dans la théorie des possibilités. La logique floue trouve ses applications dans des divers domaines dont le filtrage [VAN, 03], la commande, la supervision [MIK, 04] et la communication [SAW, 04]. La logique floue conduit à des raisonnements souples pour les raisons suivantes :

- elle permet de manipuler des valeurs de vérité intermédiaires entre les limites vraies ou fausses (imposées dans la logique classique),
- elle permet de balayer les domaines de discours des variables, en utilisant le quantificateur universel $\forall$ ou existentiel $\exists$,
- elle permet de faire une description qualitative de la valeur de vérité pour une proposition, en introduisant une approche possibiliste,
- elle utilise des règles de déduction qui vérifient – à la limite – la logique classique.

IV.3.3.1.1 Ensembles Flous

Un ensemble flou est une généralisation d'un sous-ensemble de l'univers X défini par :

$$M= \{(x, M_X(x)), x\in X\}$$

où la fonction $M : X \rightarrow [0, 1]$ est appelée fonction d'appartenance et décrit la mesure d'appartenance des éléments génériques $x \in X$ à l'ensemble flou M.

Une variable linguistique est une variable dont les valeurs sont des mots ou des phrases exprimées dans un langage naturel ou artificiel [MIN, 04]. Une variable floue est un quadruplet défini par la convention suivante :

$$x\rightarrow \langle x_nom, T_X, X, M_X\rangle$$

- x_nom est le nom de la variable linguistique
- T_X est l'ensemble des variables linguistiques qui décrivent la variable x. Elles définissent des classes aux quelles la variable floue x peut appartenir.

- X représente le domaine physique de la variable x. Il est appelé aussi univers de discours et représente l'ensemble des toutes les valeurs numériques que peut prendre la variable numérique x associée à la variable linguistique x_nom.
- M_X est une fonction sémantique qui associe à chaque variable linguistique une signification floue (ensemble flou).

Une variable floue x, dans un univers de discourt X est caractérisée par :

$$T_X(x) = [T_x^1, T_x^2, ..., T_x^k] \text{ et } M_X(x) = [M_x^1, M_x^2, ..., M_x^k]$$

où

$T_X(x)$: est l'ensemble des variables linguistiques de la variable x, sur un univers de discours X ($T_X(x) \in T_X$).

$M_X(x)$: est l'ensemble des fonctions d'appartenance associées à la variable x, sur un univers de discours X. ($M_X(x) \in M_X$).

Exemple IV.1

Pour une variable quelconque, Figure IV.6, – erreur (x est nommé erreur), on suppose qu'elle est décrite par les variables linguistiques : T_X={N, Z, P} où N= T_x^1= Négative, Z= T_x^2= Zéro, P= T_x^3= Positive. Soit l'univers du discours associé X défini par : X= [–0.5, 0.5]. En considérant la connaissance complète de la variable linguistique x → ⟨erreur, T_X, X, M_X⟩, on peut définir la description floue pour une valeur numérique mesurée de l'erreur.

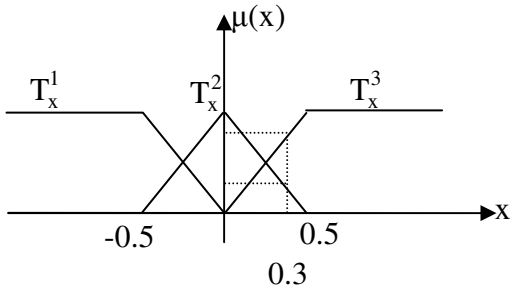


Figure IV.6 : Représentation d'une variable floue x

Un sous-ensemble flou A sur un référentiel X est caractérisé par une fonction d'appartenance μ_A qui associe à chaque élément x de X un nombre réel dans l'intervalle [0, 1] :

$$\mu_A : X \rightarrow [0, 1]$$

La valeur $\mu_A(x)$ représente le degré d'appartenance de x à A.

IV.3.3.1.2 Système d'Inférence Flou (SIF)

Un SIF représente le mécanisme qui met en forme les critères de la logique floue dans les applications spécifiques. Il se trouve à la base des mécanismes de contrôle, modélisation, approximation, détection, reconnaissances des formes, diagnostic, reprise, etc.

En utilisant les variables d'entrées floues, le SIF permet d'implémenter, sur la base de règles floues, la dépendance logique entre ces variables et les variables floues de sortie [SHA, 08]. Le SIF, par ses modules composants spécialisés, transforme autant les variables d'entrée que celles de sortie en variables numériques ou floues (Figure IV.7) :

- La fuzzyfication transforme une variable d'entrée numérique dans un sous-ensemble flou,
- L'inférence identifie le sous-ensemble flou de sortie en appliquant la dépendance des variables entrées - sorties par l'intermédiaire d'une base de règles floues,
- La défuzzyfication transforme le sous-ensemble flou de sortie dans une variable numérique ferme.

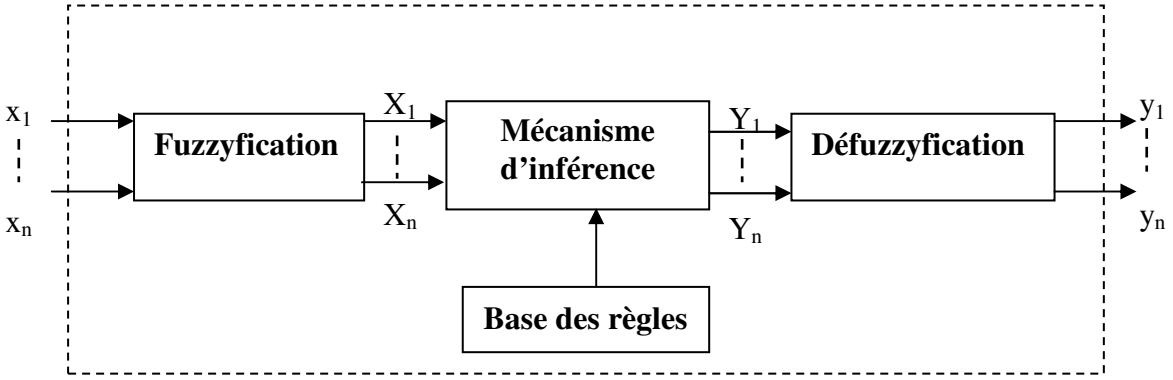


Figure IV.7 : Structure d'un SIF

A/ Fuzzyfication des variables d'entrées et de sorties

La fuzzyfication numérique permet l'approximation d'une variable numérique par un ensemble flou décrit par une distribution gaussienne. La fuzzyfication symbolique transforme une valeur numérique dans un sous-ensemble flou qui exprime son appartenance à une classe floue correspondant à une variable linguistique T_X. L'opération de fuzzyfication symbolique est appelée aussi discrétisation floue. Les deux types de fuzzyfication sont valables pour les variables d'entrée ainsi que pour les variables de sortie. En considérant la variable d'entrée générique x et la variable de sortie générique y, ainsi que les deux manières possibles de fuzzyfication (Figure IV.8) :

- Numérique

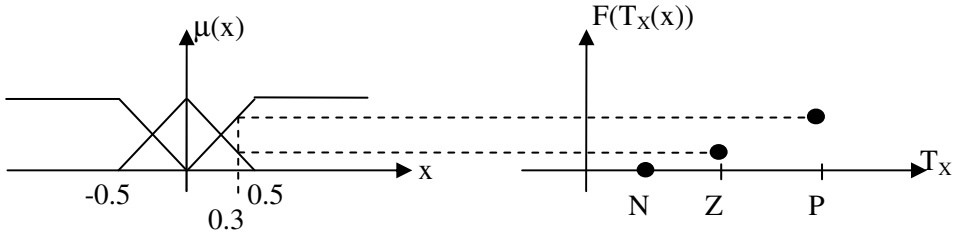
$$\forall\ x \in X, x \xrightarrow{\text{Fuzzyfication numérique}} F(X)$$

$$\forall\ y \in Y, y \xrightarrow{\text{Fuzzyfication numérique}} F(Y)$$

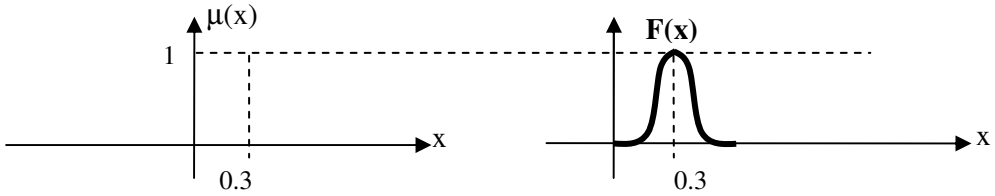
- Symbolique

$$\forall x \in X, \forall T_X(x) \in T_X, x \xrightarrow{\text{Fuzzyfication symbolique}} F(T_X(x))$$

$$\forall y \in Y, \forall T_Y(y) \in T_Y, y \xrightarrow{\text{Fuzzyfication symbolique}} F(T_Y(y))$$



(a) Fuzzyfication symbolique de 0.3



(b) Fuzzyfication numérique de 0.3

Figure IV.8 : Différents types de fuzzyfication

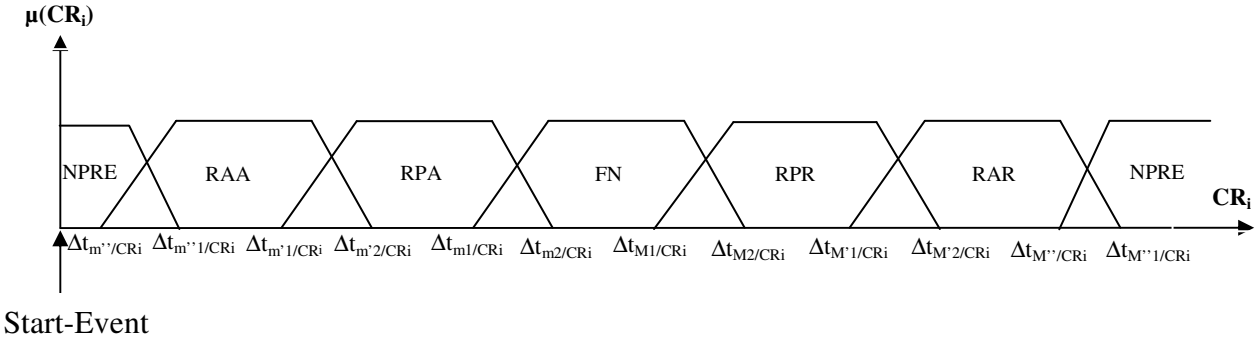
La fuzzification consiste à convertir les variables d'entrées ainsi que celles de sorties en des sous- ensembles flous [RAC, 06]. Dans le cadre de notre étude, le système d'inférence floue est composé de :

- Deux variables d'entrées (compte-rendu et Start-Event),
- Deux variables de sorties (Type du symptôme et Décision de la Commande).

– **Fuzzyfication du Compte-Rendu CR_i**

Dans le cadre de l'intégration de la robustesse dans la supervision de systèmes manufacturiers à contraintes de temps, nous définissons, figure IV.9, treize intervalles de temps, à savoir:

I_{1i} = [0, $\Delta t_{m''/CRi}$[, I_{2i}= [$\Delta t_{m''/CRi}$, $\Delta t_{m''1/CRi}$[, I_{3i}= [$\Delta t_{m''1/CRi}$, $\Delta t_{m'1/CRi}$[, I_{4i}= [$\Delta t_{m'1/CRi}$, $\Delta t_{m'2/CRi}$[, I_{5i}= [$\Delta t_{m'2/CRi}$, $\Delta t_{m1/CRi}$[, I_{6i}= [$\Delta t_{m1/CRi}$, $\Delta t_{m2/CRi}$[, I_{7i}= [$\Delta t_{m2/CRi}$, $\Delta t_{M1/CRi}$[, I_{8i}= [$\Delta t_{M1/CRi}$, $\Delta t_{M2/CRi}$[, I_{9i}= [$\Delta t_{M2/CRi}$, $\Delta t_{M'1/CRi}$[, I_{10i}= [$\Delta t_{M'1/CRi}$, $\Delta t_{M'2/CRi}$[, I_{11i}= [$\Delta t_{M'2/CRi}$, $\Delta t_{M''/CRi}$[, I_{12i}= [$\Delta t_{M''/CRi}$, $\Delta t_{M''1/CRi}$[et I_{13i}= [$\Delta t_{M''1/CRi}$, +∞[. L'ensemble de ces intervalles sont cités dans tableau IV.1.



Start-Event

Figure IV.9: Fuzzification de la variable CR_i [MHA, 10b]

Notations

RAA : Robustesse Active à une Avance.
RPA : Robustesse Passive à une Avance.
FN : Comportement Normal.
RPR : Robustesse Passive à un Retard.
RAR : Robustesse Active à un Retard.
NPRE : Pas de preuve d'existence de Robustesse.

Tableau IV.1

T_{CR_i}	**Variables linguistiques**
$T^1_{CR_i}$	CR_i arrive dans l'intervalle $I_{1i}=[0, \Delta t_{m''/CRi}[$
$T^2_{CR_i}$	CR_i arrive dans l'intervalle $I_{2i}=[\Delta t_{m''/CRi}, \Delta t_{m''1/CRi}[$
$T^3_{CR_i}$	CR_i arrive dans l'intervalle $I_{3i}=[\Delta t_{m''1/CRi}, \Delta t_{m'1/CRi}[$
$T^4_{CR_i}$	CR_i arrive dans l'intervalle $I_{4i}=[\Delta t_{m'1/CRi}, \Delta t_{m'2/CRi}[$
T^5_{CRi}	CR_i arrive dans l'intervalle $I_{5i}=[\Delta t_{m'2/CRi}, \Delta t_{m1/CRi}[$
$T^6_{CR_i}$	CR_i arrive dans l'intervalle $I_{6i}=[\Delta t_{m1/CRi}, \Delta t_{m2/CRi}[$
$T^7_{CR_i}$	CR_i arrive dans l'intervalle $I_{7i}=[\Delta t_{m2/CRi}, \Delta t_{M1/CRi}[$
$T^8_{CR_i}$	CR_i arrive dans l'intervalle $I_{8i}=[\Delta t_{M1/CRi}, \Delta t_{M2/CRi}[$
$T^9_{CR_i}$	CR_i arrive dans l'intervalle $I_{9i}=[\Delta t_{M2/CRi}, \Delta t_{M'1/CRi}[$
$T^{10}_{CR_i}$	CR_i arrive dans l'intervalle $I_{10i}=[\Delta t_{M'1/CRi}, \Delta t_{M'2/CRi}[$
$T^{11}_{CR_i}$	CR_i arrive dans l'intervalle $I_{11i}=[\Delta t_{M'2/CRi}, \Delta t_{M''/CRi}[$
$T^{12}_{CR_i}$	CR_i arrive dans l'intervalle $I_{12i}=[\Delta t_{M''/CRi}, \Delta t_{M''1/CRi}[$
$T^{13}_{CR_i}$	CR_i arrive dans l'intervalle $I_{13i}=[\Delta t_{M''1/CRi}, +\infty[$

La marge de robustesse passive disponible est dans $(I_{2i} \cup I_{3i} \cup I_{4i}) \cup (I_{6i} \cup I_{7i} \cup I_{8i})$ alors que la marge de robustesse active est dans $(I_{1i} \cup I_{2i}) \cup (I_{8i} \cup I_{9i})$. D'un point de vue fonctionnel, il y a trois plages d'utilisation dont il est possible de prouver la validité: le fonctionnement normal, la plage de robustesse passive et la plage de robustesse active. Dans le cas d'un fonctionnement anormal, il y a toujours dualité des scénarios d'avance et de retard.

– **Fuzzification de la variable Start-Event (A_i)**

Les différentes fonctions d'appartenance de la variable A_i, sont représentées par la figure IV.10.

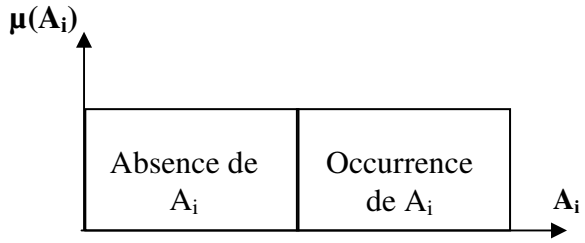


Figure IV. 10 : Fonctions d'appartenance de la variable A_i aux classes floues [MHA, 10b]

Tableau IV.2 : Variables linguistiques associées au Start-Event A_i

T_{A_i}	**Variables linguistiques**
$T^1_{A_i}$	Occurrence du Start-Event A_i
$T^2_{A_i}$	Absence du Start-Event A_i

– **Fuzzification de la variable Type du symptôme (S_i)**

La figure IV.11, montre une distribution uniforme des fonctions d'appartenances floues associées à la variable de sortie "Type du symptôme".

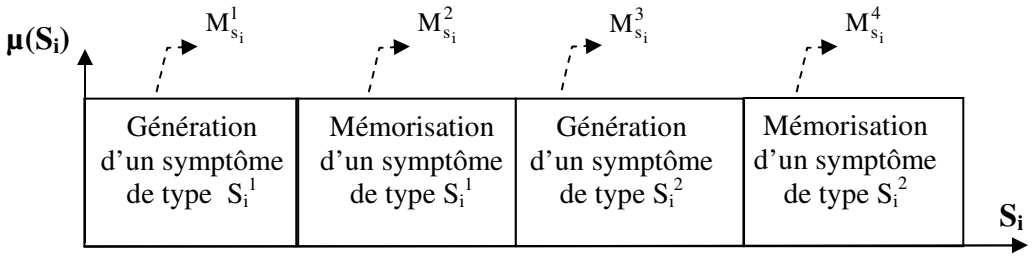


Figure IV.11: Fonctions d'appartenance de la variable S_i aux classes floues [MHA, 10b]

Les variables linguistiques associées à la variable de sortie "type du symptôme" sont citées dans le tableau IV.3.

Tableau IV.3 : Variables linguistiques associées au type du symptôme S_i

T_{S_i}	**Variables Linguistiques**
$T^1_{S_i}$	Génération d'un symptôme S_i^1
$T^2_{S_i}$	Mémorisation d'un symptôme S_i^1
$T^3_{S_i}$	Génération d'un symptôme S_i^2
$T^4_{S_i}$	Mémorisation d'un symptôme S_i^2

– **Fuzzification de la variable Décision de la Commande (CD)**

La figure IV.12 montre les trois sous-ensembles flous associés à la variable de sortie CD. Par suite, on distingue trois fonctions d'appartenances, uniformément distribuées, nommées M^1_{CD}, M^2_{CD} et M^3_{CD}. Les variables linguistiques sont indiquées dans le tableau IV.4.

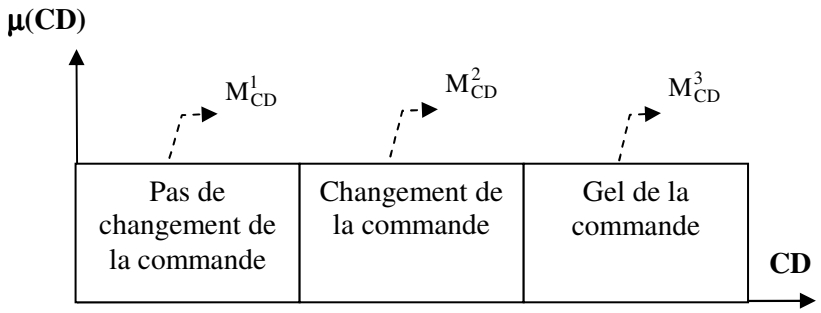


Figure IV.12 : Fonctions d'appartenance de la variable CD [MHA, 10b]

Tableau IV.4 : Variables linguistiques associées à la variable CD

T_{CD}	**Variables Linguistiques**
T^1_{CD}	Pas de changement de la commande
T^2_{CD}	Changement de la commande
T^3_{CD}	Gel de la commande

La classification floue des variables d'entrées et de sorties permet d'affiner les informations acquises sur le terrain. Ceci se fait en introduisant un élément de type « degré de vérité » (réel compris entre 0 et 1) associé à la variable floue.

B/ Mécanisme d'inférence

B-1/ Construction d'une base de règles

Une règle floue est basée sur un raisonnement approximatif ou imprécis. Elle exprime la connaissance approximative de la relation conditionnelle entre deux ou plusieurs variables [LOT, 07].

Dans l'approche ZMA (Zadeh-Mamdani-Assilian), une règle floue est généralement interprétée comme une conjonction entre l'antécédence et la conséquence ou autrement dit comme une superposition des propositions logiques simultanément vraies [TEN, 97] :

$$R^U: \rightarrow \underbrace{\text{SI } \underbrace{(x_1 \text{ est } T_{x_1})}_{X_1} \text{ ET} \ldots \text{ET } \underbrace{(x_p \text{ est } T_{x_p})}_{X_p}}_{X} \text{ ALORS } \underbrace{\underbrace{y_1 \text{ est } T_{y_1}}_{Y_1} \text{ ET} \ldots \text{ET } \underbrace{y_q \text{ est } T_{y_q}}_{Y_q}}_{Y} \qquad \text{IV.1}$$

Une telle approche peut être interprétée comme une interaction entre l'ensemble flou X obtenu par l'intersection des ensembles flous$\{X_1, X_2, \ldots, X_p\}$et l'ensemble flou qui modélise la sortie Y, obtenu par l'intersection des ensembles flous$\{Y_1, Y_2, \ldots, Y_q\}$.

En se basant sur l'approche ZMA, une base de règles est construite :

Règle 1 : S'il y a absence de commande (pas de A_i) ET présence de CR_i ALORS il y a un gel de commande ET génération d'un symptôme S_i^2.

Règle 2 : SI le compte-rendu CR_i arrive dans l'intervalle de temps ($I_{1i} \cup I_{2i}$) ET occurrence de A_i ALORS il y' a gel de la commande (NPRE) ET génération d'un symptôme S_i^2.

Règle 3 : SI le compte-rendu CR_i arrive dans les intervalles de temps ($I_{2i} \cup I_{3i} \cup I_{4i}$) ET occurrence de A_i ALORS il y' a changement de la conduite (RAA) ET une mémorisation d'un symptôme S_i^2.

Règle 4 : SI le compte-rendu CR_i arrive dans l'intervalle de temps ($I_{4i} \cup I_{5i} \cup I_{6i}$) ET occurrence de A_i ALORS il n'y a pas changement de la conduite (RPA) ET une mémorisation d'un symptôme S_i^2.

Règle 5 : SI le compte-rendu CR_i arrive dans l'intervalle de temps ($I_{6i} \cup I_{7i} \cup I_{8i}$) ET occurrence de A_i ALORS il n'y a pas changement de la conduite (FN).

Règle 6 : SI le compte-rendu CR_i arrive dans l'intervalle de temps ($I_{8i} \cup I_{9i} \cup I_{10i}$) ET occurrence de A_i ALORS il n'y a pas changement de la conduite (RPR) ET mémorisation d'un symptôme S_i^1.

Règle 7 : SI le compte-rendu CR_i arrive dans l'intervalle de temps ($I_{10i} \cup I_{11i} \cup I_{12i}$) ET occurrence de A_i ALORS il y' a changement de la conduite (RAR) ET mémorisation d'un symptôme S_i^1.

Règle 8 : SI le compte-rendu CR_i arrive dans l'intervalle de temps $I_{13i}= [\Delta t_{M''1/CRi}, +\infty[$ ALORS il y' a gel de la commande (NPRE) ET génération d'un symptôme S_i^1.

B-2/ Choix d'une méthode d'inférence

La prochaine étape consiste à traduire les opérateurs OU, ET et l'implication par une des fonctions (maximum, produit, minimum, …). La combinaison de ces différentes fonctions conduit à plusieurs méthodes d'inférences. Parmi ces méthodes, on va adopter la méthode max – min.

Propriété de la méthode max – min (Mamdani)

Au niveau de la condition : ET est représenté par la fonction MIN
OU est représenté par la fonction MAX
Au niveau de la conclusion : OU est représenté par la fonction MAX
ALORS est représenté par la fonction MIN

C/ Défuzzyfication

Après avoir construit la base des règles, la défuzzyfication transforme l'ensemble flou obtenu par inférence des règles, en une valeur numérique. En règle générale, on associe cette valeur à la variable de sortie y qui se trouve dans la conséquence de la base des règles. Étant un processus inverse à celui de fuzzyfication, la défuzzyfication est aussi numérique et symbolique.

La défuzzyfication numérique transforme une distribution floue en une valeur numérique en appliquant des différentes méthodes mathématiques. La méthode la plus

couramment utilisée est celle qui prend en compte la position du centre de gravité de la surface délimitée de la distribution floue $\mu_F(y)$ et Oy (Figure IV.13):

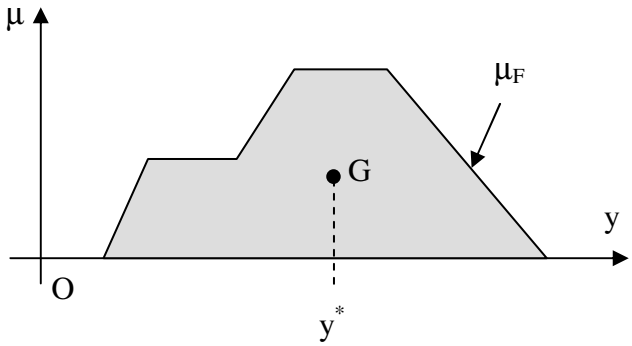


Figure IV.13 : Défuzzyfication par le centre de gravité

Dans ce cas la valeur du centre de gravité est donné par l'expression IV.2, si y est une variable discrète [MIN, 04] :

$$y^* = \frac{\sum_{y \in Y} \mu(F(y)).y}{\sum_{y \in Y} \mu(F(y))} \qquad \text{IV.2}$$

IV.3.3.2 Exemple illustratif

Afin de montrer l'efficacité du de l'approche floue de filtrage des comptes-rendus, un exemple utilisant deux règles floues (Régle 2 et Régle 3), est proposé.

Règle 2 : SI le compte-rendu CR_i arrive dans l'intervalle de temps ($I_{1i} \cup I_{2i}$) ET occurrence de A_i ALORS il y' a gel de la commande (NPRE) ET génération d'un symptôme S_i^2.

Règle 3 : SI le compte-rendu CR_i arrive dans les intervalles de temps ($I_{2i} \cup I_{3i} \cup I_{4i}$) ET occurrence de A_i ALORS il y' a changement de la conduite (RAA) ET une mémorisation d'un symptôme S_i^2.

Chaque règle utilise l'opérateur ET dans la prémisse, de ce fait la fonction MIN est utilisée (méthode d'inférence de Mamdani). Les variables de sortie, qui correspondent à ces règles, sont présentées par les figures IV.14 et IV.15.

Afin de transformer l'ensemble flou obtenu par inférence des règles, en une valeur numérique, l'étape de défuzzyfication est introduite. En pratique, on a deux variables de sortie floues à déffuzzyfier (Type du symptôme et Décision de la Commande), afin d'obtenir une valeur numérique. Les centres de gravité G_{SY} et G_{CD} représentant les valeurs numériques associées respectivement aux deux variables de sortie type de symptôme et décision de commande, sont cités dans le tableau IV.5. Ces valeurs sont calculées à partir des valeurs spécifiques des comptes-rendus CR_i et du Start-Event A_i et en utilisant la relation (IV.2).

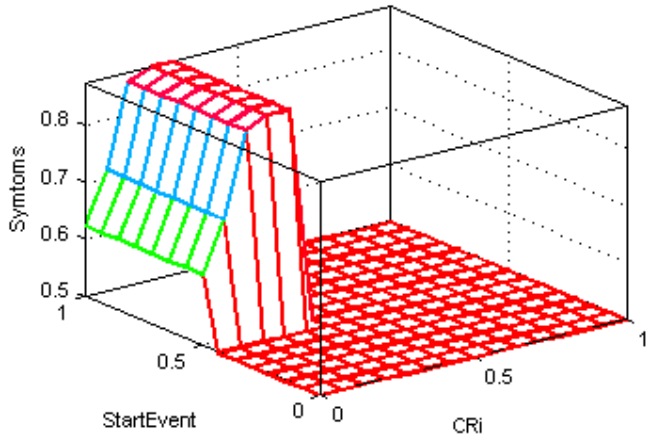


Figure IV.14 : Surface d'action [Symptômes=f(CR_i, A_i)]

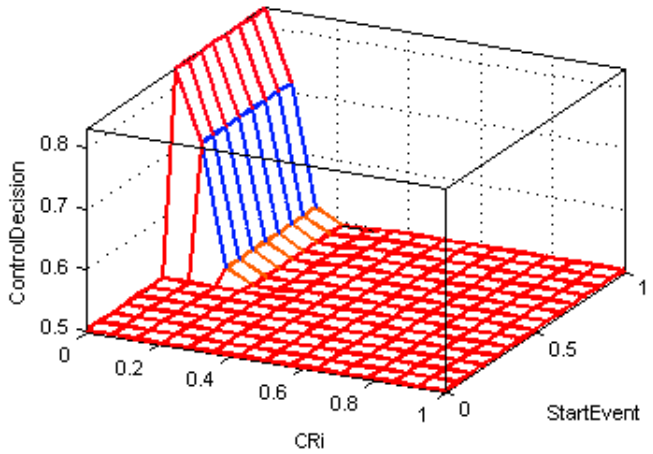


Figure IV.15 : Surface d'action [Control Decision= f(CR_i, A_i)]

Tableau IV.5 : Mesures de G_{SY} et de G_{CD}

Variables	Mesures		
	Premier cas	**Deuxiéme cas**	**Troisiéme cas**
CR_i	CR_i arrive dans l'intervalle I_{1i}	CR_i arrive dans l'intervalle I_{2i}	CR_i arrive dans l'intervalle I_{3i}
A_i	Occurrence de A_i	Occurrence de A_i	Occurrence de A_i
G_{CD}	$G_{CD} \in M^3_{CD}$	$G_{CD} \in M^2_{CD}$	$G_{CD} \in M^2_{CD}$
G_{SY}	$G_{SY} \in M^3_{S_i}$	$G_{SY} \in M^4_{S_i}$	$G_{SY} \in M^4_{S_i}$

En analysant les résultats du tableau IV.5, on peut conclure que le premier et le troisième cas correspondent à un mécanisme de filtrage classique des comptes-rendus intégrant la robustesse, présenté dans [JER, 06e]. Le deuxième cas, qui représente un mécanisme de filtrage flou, permet d'obtenir un résultat plus fin que le premier et le deuxième cas, puisque il permet d'éviter un gel de commande ("G_{CD}" appartient à la fonction d'appartenance «changement de la conduite») même si le compte-rendu CR_i arrive dans l'intervalle «pas de

preuve d'existence de robustesse». Il faudra aussi faire appel à la compétence d'un expert qui peut conclure si la production reste acceptable, malgré certaines perturbations.

IV.3.4 Conclusion

Le filtrage flou permet, de préserver la fonction de production sur une plage étendue. Nous avons ainsi montré que la robustesse permet de poursuivre la production dans un mode qualifié de dégradé, fournissant des garanties de qualité et de sûreté satisfaisante, tout en intégrant la possibilité d'intégrer le savoir faire des experts de l'atelier.

IV.4 Surveillance d'un atelier de production laitière

La surveillance des processus industriels permet d'accroître la productivité et de diminuer le coût d'entretien par l'amélioration de la disponibilité des systèmes de production [KOM, 04]. Ces processus sont susceptibles d'évoluer sous deux types de modes de fonctionnement : des modes normaux et des modes anormaux. La surveillance comporte deux fonctions : la détection et le diagnostic.

IV.4.1 Description des différents modules de la structure de surveillance

Nous nous sommes fixés comme objectif, l'intégration des outils de surveillance, supervision et de maintenance dans un système de production laitière déjà commandé. Ce qui justifie le choix de notre approche de surveillance globale. Le module de surveillance proposé, figure IV.16, est inspiré des travaux de Rayhane [RAY, 04]. Ce module reçoit alors les informations issues des capteurs, éléments de base utilisés pour la détection des défaillances et par la suite la localisation (diagnostic) de la ou des sources de pannes [RAY, 04] (ce mécanisme sera détaillé dans les parties suivantes).

Une fois la défaillance identifiée, les informations la concernant seront dirigées d'une part, vers le module de supervision qui en fonction du type et de la gravité de la panne générera des séquences de reprise, de recouvrement ou de traitement d'urgence, et d'autre part vers le module de maintenance qui collecte ces données afin de savoir à quel moment il faut engager les opérations de maintenance nécessaires. Ceci est illustré dans la figure IV.16.

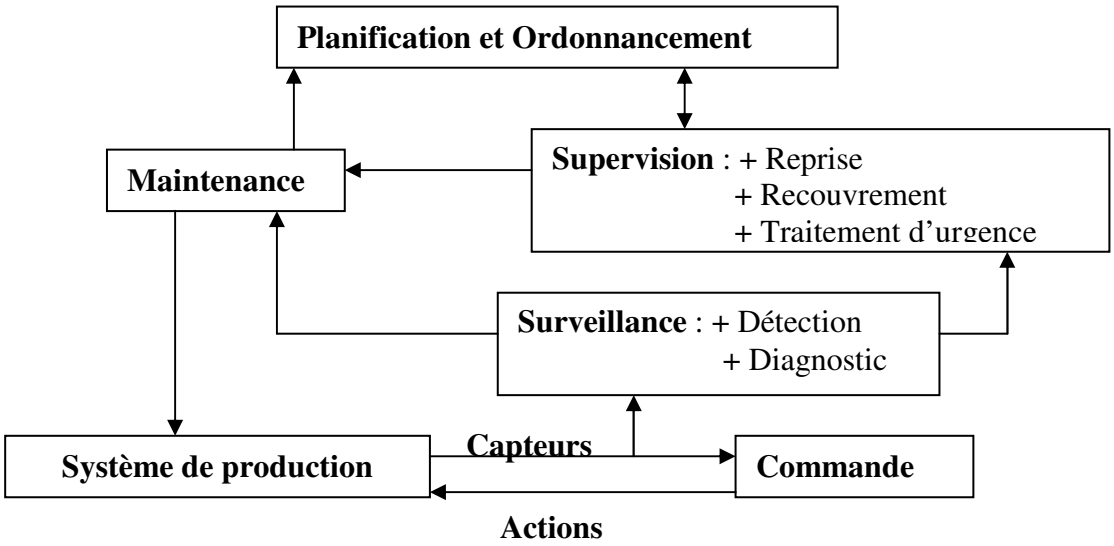


Figure IV.16 : Structure globale [RAY, 04]

Dans le module de surveillance, on retrouve les fonctions clés : détection et diagnostic. Les fonctions de reprise, recouvrement et traitement d'urgence sont comprises dans le module de supervision [COM, 00]. Alors que le module de maintenance collecte les informations du module de surveillance (vieillissement des installations ou usure des outils par exemple) et du module de supervision (statistiques des pannes par exemple), et le traitement de ces informations permet d'établir le programme d'interventions sur les installations [MHA, 07].

Les seules entrées du module de surveillance sont les informations issues des capteurs en provenance du système de production comme le montre la figure IV.17. Ce module renseigne les modules de maintenance et de supervision. Les informations destinées à la maintenance, telles que l'usure des outils ou des machines de production, sont nécessaires pour établir le planning des interventions [RAY, 03]. Quant aux informations destinées à la supervision, telles que l'état défaillant du système et les causes de la défaillance, elles permettent de prévoir la reprise, le recouvrement ou le traitement en agissant sur la commande du système.

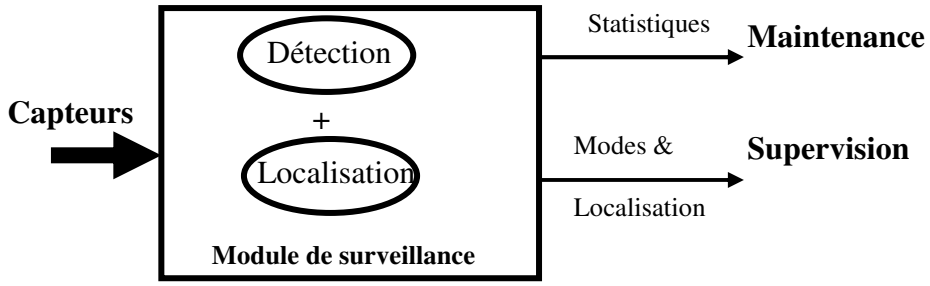


Figure IV.17 : Identification des entrées/sorties du module de surveillance [RAY, 04]

Le module de surveillance proposé, figure IV.18, est constitué de trois sous modules :

– Module structural qui définit les fonctions des différents éléments du procédé et leurs interactions,

– Module de détection distribué qui a pour rôle de détecter toute violation des spécifications de bon fonctionnement du système surveillé de manière locale ou de manière distribuée par communication et coopération entre différents superviseurs,

– Module de diagnostic qui collecte des informations destinées à la supervision, telles que l'état défaillant du système et les causes de la défaillance, permettant de prévoir la reprise, le recouvrement ou le traitement, en agissant sur la commande du système.

Dans cette approche, la détection, figure IV.18, est basée sur un modèle temporel du procédé et porte sur l'existence et non sur la nature des défaillances, en utilisant un modèle de comportement normal pour chaque élément de la partie opérative. Le modèle, sur lequel s'appuie la détection pour détecter un symptôme, est un modèle temporel, de signature temporelle, appelé chronique.

Les symptômes sont transmis vers un module de diagnostic basé sur une modélisation du procédé reflétant sa structure interne [PEN, 05]. Cette modélisation repose en partie sur le graphe fonctionnel. Ce graphe définit les fonctions des différents éléments du procédé et leurs interactions et d'autre part sur les signatures temporelles causales. Ces signatures représentent

un modèle du comportement anormal d'une partie du procédé, sachant qu'une signature temporelle causale établit une correspondance entre une séquence d'événements significatifs et une ou plusieurs causes de défaillance.

Le principe de diagnostic consiste à localiser, à l'aide des signatures temporelles causales, la zone défaillante puis identifier la fonction susceptible d'être à l'origine de la défaillance dans cette zone ; ceci est obtenu en exploitant les arbres de défaillances et le graphe fonctionnel, figure IV.18. Les défaillances identifiées sont ensuite transmises à un module de recouvrement, qui met en œuvre un certain nombre d'actions pour agir sur la partie commande et sur la partie opérative pour assurer la sécurité du système de production.

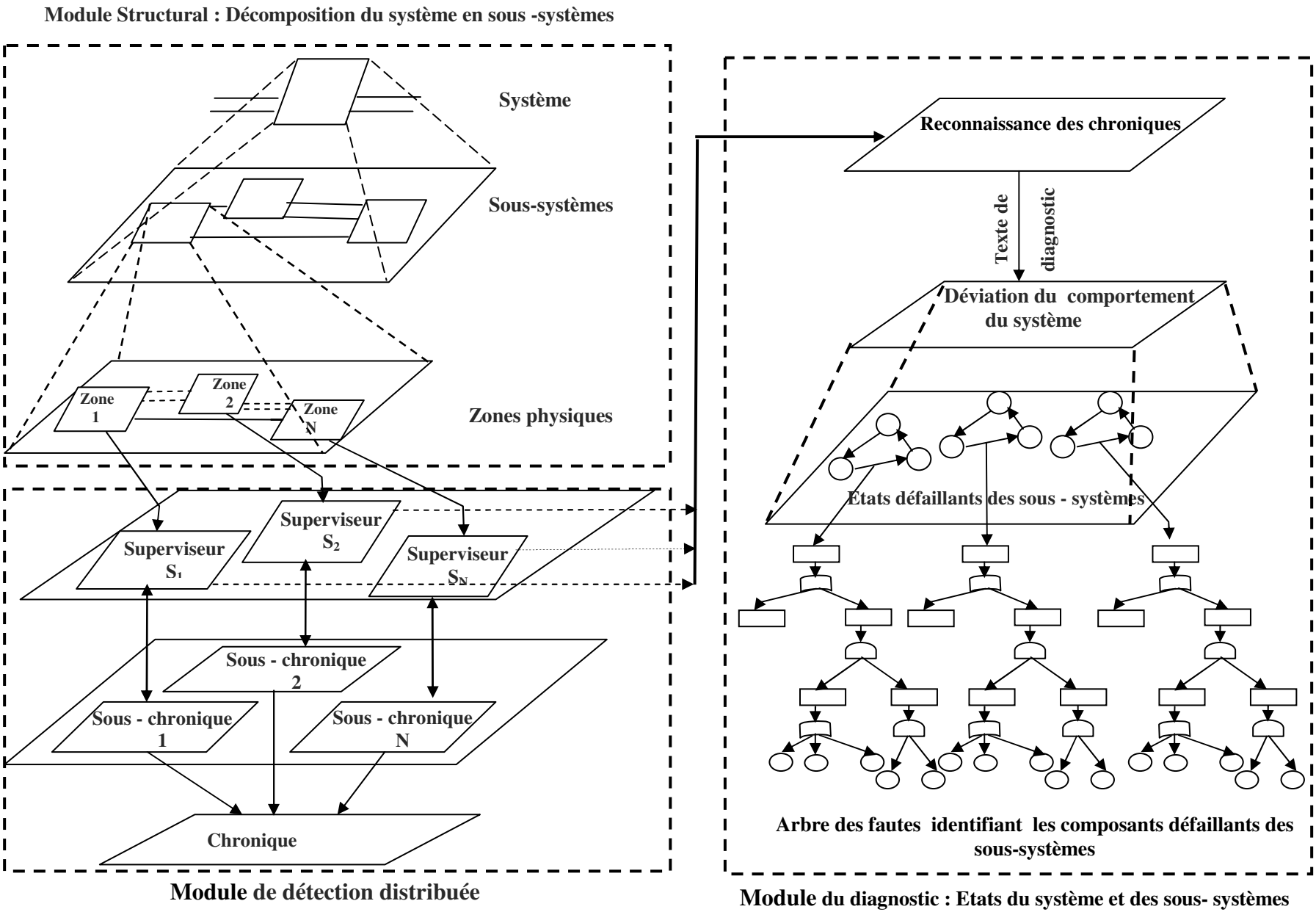


Figure IV.18 : Module de surveillance

IV.4.2 Module de détection distribuée

La fonction détection distribuée a pour rôle de détecter toute violation des spécifications de bon fonctionnement du système surveillé de manière locale ou de manière distribuée par communication et coopération entre différents superviseurs. Le diagnostic distribué, qui s'intéresse à la localisation et à l'identification de l'origine de la défaillance se trouve facilité grâce à l'observation partielle du système surveillé engendrée par l'architecture distribuée. Plusieurs travaux s'intéressent à la surveillance distribuée à base des chroniques, dont on cite [GUI, 08], [DOU, 07], [DOJ, 98] et [COR, 07].

IV.4.2.1 Définitions et thermologies

Nous reprenons ici quelques définitions utiles, [BOU, 05], à la compréhension de la suite de notre travail.

Evénement

Un événement correspond à un stimulus auquel le système doit réagir en changeant d'état. Il peut survenir suite à un message du procédé ou à la terminaison d'un processus.

Evénement reçu

Un événement "e" appartenant à l'ensemble Σ des événements du système surveillé est dit reçu par un site de surveillance "S_i" s'il peut être daté par celui ci.

Date d'occurrence

C'est la mesure à l'aide d'une horloge du système de supervision de la coordonnée temporelle d'un événement reçu. Dans un système distribué constitué de différents sites de surveillance (superviseurs) S_1, S_2,…, S_n, une horloge, dite horloge locale, est associée à chacun des sites.

Un événement est donc daté dans le repère temporel local, lié au site de surveillance "S_i" le recevant, par la fonction "Occurrence" notée "O" est défini ci-dessous:

$$O : E \rightarrow Q^+$$
$$e_i \rightarrow O(e_i)$$

"e_i" étant un événement et E l'ensemble des événements ($e_i \in E$), chaque événement reçu étant daté dans le repère temporel du site de surveillance "S_i" qui le reçoit.

Chronique

Une chronique est composée de l'ensemble des événements et d'un ensemble de contraintes liant ces événements.

Contraintes entre événements

Une contrainte est une relation impliquant une durée liant des événements. Une contrainte n'est donc jamais liée à une référence temporelle (horloge locale) ni à l'architecture de mise en œuvre. Il s'agit d'une relation traduisant une propriété intrinsèque de l'application considérée. Une contrainte peut par exemple, traduire une durée de transport entre deux sites d'une réalisation. Ces contraintes peuvent être des relations binaires ou n-aires.

Relation binaire

Deux types de contraintes peuvent être distingués [BOU, 06] :

- La contrainte de précédence : qui est définie par $O(e_i) < O(e_j)$ et qui exprime que l'événement "e_j "doit arriver après l'événement "e_i".

- La contrainte de type intervalle : qui est définie par $d_{j,i} \leq O(e_i) - O(e_j) \leq f_{j,i}$, notée "$C_{ji}$", avec $d_{j,i}$ et $f_{j,i} \in Q^+$ et qui exprime que l'événement "e_j" doit arriver après l'événement "e_i" dans l'intervalle $[d_{j,i}, f_{j,i}]$.

On distingue, figure IV.19, deux familles de contraintes :

- Les contraintes locales qui sont des contraintes liant des événements de l'ensemble Σ_i associé à un superviseur "S_i".

- Les contraintes globales qui sont des contraintes qui ne sont pas locales.

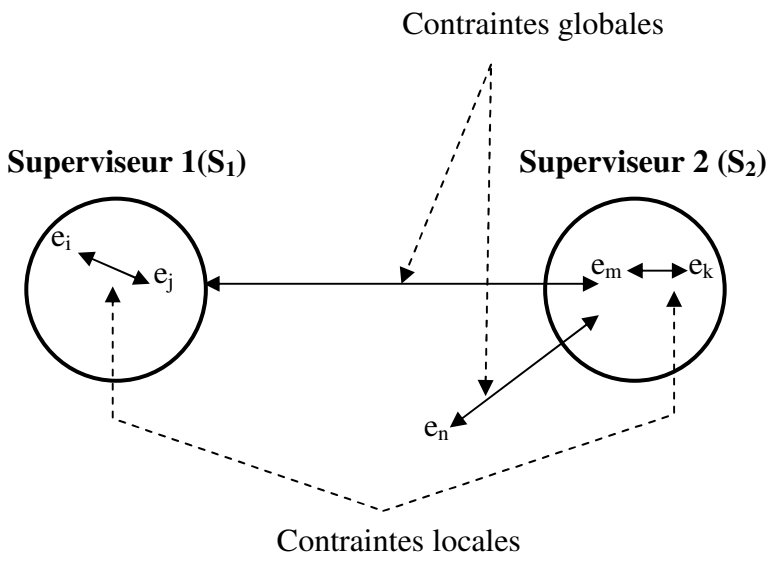


Figure IV.19 : Contraintes locales et contraintes globales

IV.4.2.2 Principe de la détection distribuée

Pour aborder le problème de la détection dans une architecture distribuée, la solution proposée, repose sur deux points [SUB, 06] :

- le modèle sur lequel s'appuie la détection pour détecter un symptôme est un modèle temporel, de signature temporelle du comportement du système surveillé. Cette signature,

appelée chronique [DOU, 93], est définie comme un ensemble d'événements et un ensemble de contraintes temporelles entre ces événements. Plusieurs types de contraintes ont été prises en compte (contrainte de précédence, contrainte de type intervalle, contrainte de type fenêtre d'admissibilité). Dès lors, la détection s'appuie sur l'observation de cette signature temporelle [COR, 00]. Le principe de la détection est donc de vérifier que chaque événement observé est cohérent vis-à-vis de la chronique spécifiée compte tenu des contraintes temporelles [TAI, 07]. Si la chronique est un modèle de fonctionnement normal, toute déviation observée ou toute violation de contrainte temporelle conduit à la détection d'un symptôme de défaillance. Dans le cas contraire où la chronique est un modèle de fonctionnement défaillant, la vérification d'une contrainte temporelle permet la détection d'un symptôme de défaillance.

- les systèmes traités sont des systèmes à événements discrets, physiquement distribués. En effet, l'architecture de surveillance est une architecture distribuée, basée sur des modules ou sites de surveillance (superviseurs) communicants. A chaque site, est associé un sous système physique en provenance duquel il reçoit un ensemble d'événements et est pourvu d'une fonction détection (figure IV.20). La détection de défaillance concernant l'ensemble des sites de surveillance est donc une détection globale, obtenue à partir de la coopération des fonctions de détection locales et n'est pas une simple répartition de la fonction détection sur différents sites isolés.

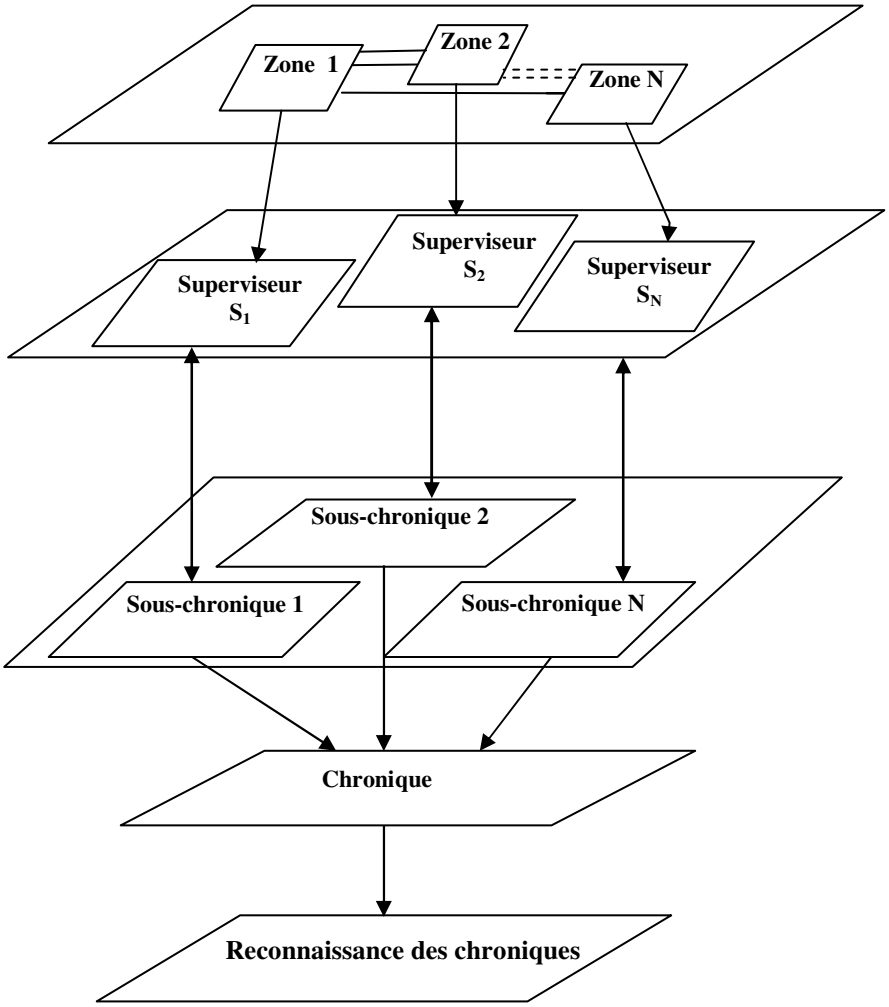


Figure IV.20 : Décomposition de la chronique en sous-chroniques [MHA, 10c]

Le modèle temporel du comportement à surveiller est distribué sur ces différents sites. Cette distribution de la chronique en sous-chroniques implique une distinction entre deux types de contraintes: des contraintes locales liant des événements reçus par un même site de surveillance, et des contraintes globales liant des événements de différents sites.

La vérification de ces contraintes globales suppose l'existence d'outils de communication permettant des échanges d'événements entre les sites de surveillance. L'adoption d'une architecture distribuée conduit en effet à une minimisation de l'information globale.

Mais dans bien des cas, l'information partielle à laquelle chaque site peut accéder n'est pas suffisante et des communications entre sites deviennent indispensables pour compenser cette insuffisance. Dans une architecture distribuée, ces aspects de communication ne sont pas triviaux et des problèmes spécifiques sont à prendre en compte telle la synchronisation d'horloges, la reconstitution de l'ordre des messages échangés, la prise en compte des délais de communication.

IV.4.2.3 Prise en compte du délai de communication dans la vérification des contraintes

Les contraintes faisant partie d'une sous-chronique pouvant être globales, la communication entre différents superviseurs afin de les vérifier est donc nécessaire. En effet, les superviseurs doivent s'échanger les occurrences de certains événements afin de pouvoir vérifier les contraintes globales.

Dans ce contexte, la contribution de Boufaied [BOU, 06] est d'évaluer l'influence des délais de communication entre modules sur la vérification des contraintes temporelles. En particulier, la solution proposée évalue l'incertitude introduite par ces délais de communication au niveau de la vérification de contraintes globales. La technique élaborée est adaptée à tout système dans lequel les contraintes opérationnelles et l'incertitude sur les délais de communications sont du même ordre, tel les systèmes informatiques ou les systèmes de transport. Pour ces derniers, la notion de délai de communication correspond à celle de délai de transport entre sites de stockage ou de production par exemple.

Le problème abordé peut alors être énoncé de la manière suivante [BOU, 06] :

Soit un système à deux superviseurs "S_A" et "S_B". Supposons que l'événement "e_B" soit reçu par le superviseur "S_B" et que "e_A" soit reçu par le superviseur "S_A" (figure IV.21).

On s'intéresse à la surveillance de la contrainte globale "C_{BA}" liant O (e_B) et O (e_A) par le superviseur B. Soit "e_k" un événement (événement intermédiaire) envoyé par le superviseur A et reçu par le superviseur B. Les événements "e_B" et "e_k" sont tous deux reçus par le superviseur B et donc datés sur ce même site. En plus, le site B possède la connaissance des bornes min et max de la durée Δ qui s'est écoulée entre l'événement "e_k" qu'il a reçu et celle de "e_A" daté par "S_A". Cette durée Δ, représente dans les systèmes informatiques, un délai de communication, alors qu'elle représente dans les chaînes logistiques ou les systèmes de transport une durée opératoire.

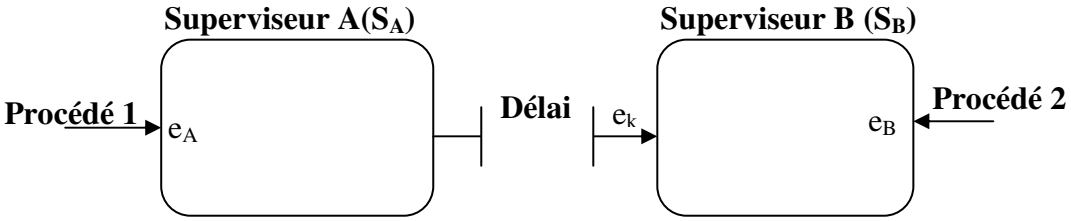


Figure IV.21 : Echange de données entre les deux superviseurs

Connaissant la durée entre les dates d'occurrences $O(e_B)$ et $O(e_k)$, notée Φ ($\Phi = O(e_B) - O(e_k)$), la contrainte "C_{BA}" est donnée par :

$$C_{BA} : d_{B,A} \leq O(e_B) - O(e_A) \leq f_{B,A} \qquad \text{IV.3}$$

En tenant compte de la durée Δ ($\Delta = O(e_k) - O(e_A)$), nous pouvons écrire que :

$$O(e_B) - O(e_A) = (O(e_B) - O(e_k)) + \Delta = \Phi + \Delta \qquad \text{IV.4}$$

Soit encore, puisque $\delta_m \leq \Delta \leq \delta_M$ avec $\delta_m, \delta_M \in Q^+$:

$$\Phi + \delta_m \leq (O(e_B) - O(e_A)) \leq \Phi + \delta_M \text{ (Contrainte locale)} \qquad \text{IV.5}$$

L'inégalité (IV.5) exprime la contrainte à vérifier, mais vue par le superviseur "S_B". La surveillance de la contrainte de type intervalle C_{BA} consiste alors à chercher à partir des durées mesurables $O(e_B) - O(e_k)$, les durées $O(e_B) - O(e_A)$ qui vérifient à la fois les inégalités suivantes :

$$\begin{cases} d_{B,A} \leq O(eB) - O(eA) \leq f_{B,A} \\ O(e_B) - O(e_k) + \delta_m \leq O(e_B) - O(e_A) \leq O(e_B) - O(e_k) + \delta_M \end{cases}$$

Une représentation graphique des ces deux contraintes dans le même plan nous conduit à la figure IV.22. Dans le plan $O(e_B) - O(e_k)$, $O(e_B) - O(e_A)$, les inégalités (IV.3) et (IV.5) définissent chacune une bande ou région. Les durées recherchées appartiennent à l'intersection de ces deux bandes qui définit un polygone noté PO.

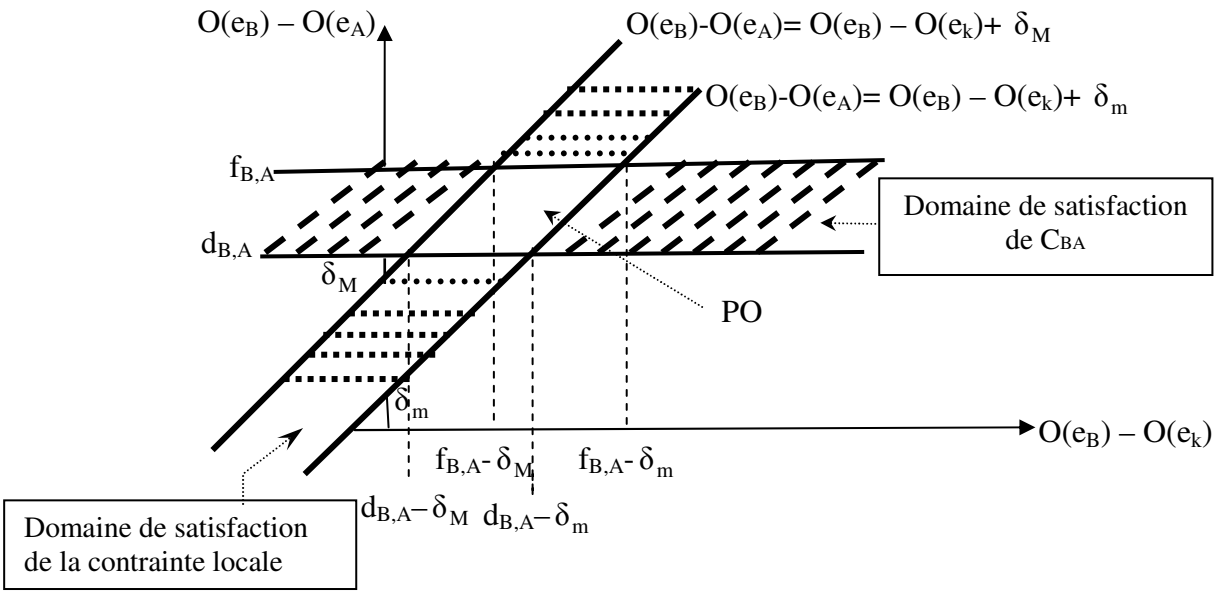


Figure IV.22: Représentation graphique des contraintes (IV.3) et (IV.5) [BOU, 06]

L'incertitude du délai se traduit par le fait qu'à une durée mesurée donnée, correspond toute une plage de valeurs pour la durée recherchée.

La position de PO dépend de la durée $O(e_B) - O(e_A)$ mais également des positions des bornes de la durée Δ par rapport aux bornes $d_{B,A}$ et $f_{B,A}$. Un cas quelconque est présenté dans la figure IV.23.

Pour une durée Δ quelconque, $\delta_m \leq \Delta \leq \delta_M$, PO est défini par les quatre points X_1, X_2, X_3 et X_4 de coordonnées respectives $(d_{B,A} - \delta_M, d_{B,A})$, $(d_{B,A} - \delta_m, d_{B,A})$, $(f_{B,A} - \delta_m, f_{B,A})$ et $(f_{B,A} - \delta_M, f_{B,A})$. Nous noterons par la suite "X_i" l'abscisse du point i dans le plan de notre étude. La figure IV.23 montre les différentes formes du polygone PO selon la comparaison entre les durées $(f_{B,A} - d_{B,A})$ et $(\delta_M - \delta_m)$.

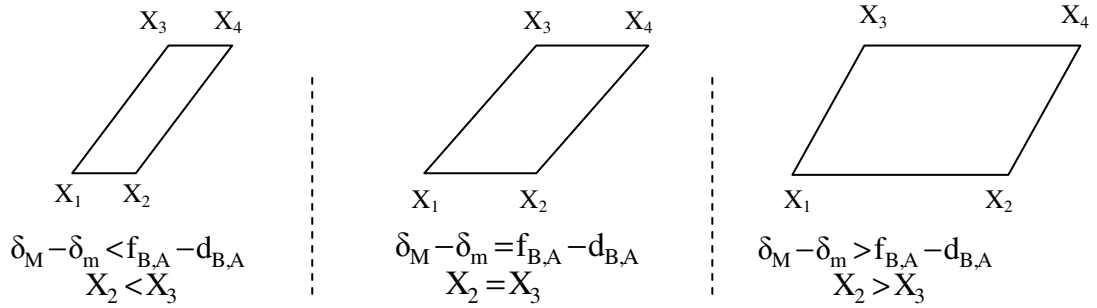


Figure IV.23 : Représentations graphiques du polygone PO

Les travaux présentés dans [BOU, 06] ont pour objectif de quantifier parmi l'ensemble des durées possibles recherchées celles qui vérifient la contrainte globale initiale C_{BA}. Plus précisément, Boufaied a cherché à évaluer la possibilité de vérifier la contrainte globale compte tenu de la durée locale mesurée.

Une fonction de possibilité, figure IV.24, est donc associée à une contrainte globale. Cette fonction est générale et valable quelle que soit la relation d'ordre qui peut exister entre la durée de l'intervalle associé à la contrainte à vérifier ($[d_{B,A}, f_{B,A}]$) et la durée de l'intervalle représentant l'incertitude sur le délai de communication ($[\delta_m, \delta_M]$).

Ces résultats permettent de mettre en évidence des zones de certitude pour la fonction détection [MHA, 10c]. Si les contraintes à vérifier sont associées à un comportement normal du système surveillé, une valeur de possibilité élevée garantit un comportement normal du système surveillé. Au contraire, une faible valeur de possibilité implique la détection d'un symptôme de défaillance.

Le problème qui se pose alors est de fixer les valeurs seuils qui définissent ces zones de certitude ou de tolérance pour la fonction détection. Une des solutions proposées par Boufaied [BOU, 06] consiste à faire revérifier la contrainte par un autre site de surveillance en espérant que la mesure de possibilité associée à cette revérification permette d'obtenir une certitude. Pour cela, des mécanismes de coopération et les conditions sous lesquelles ces coopérations peuvent avoir lieu ont été définies [BOU, 06].

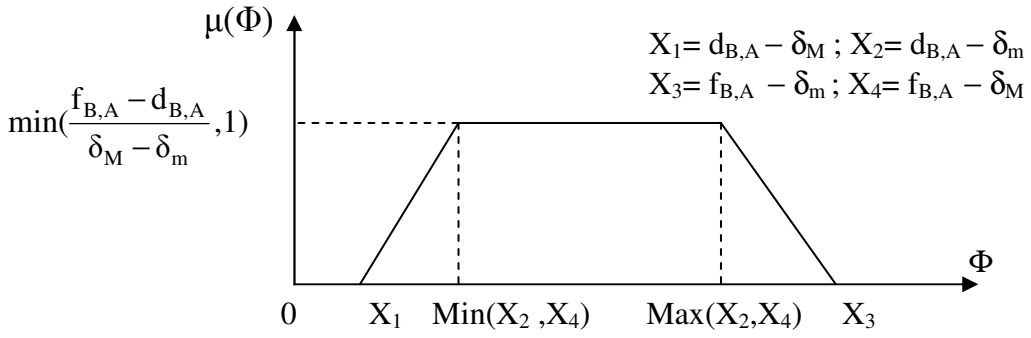


Figure IV.24 : La fonction d'appartenance à l'ensemble flou Φ, cas de la contrainte de type intervalle [BOU, 06]

IV.4.2.4 Exemple d'application [BOU, 05]

Un avion, figure IV.25, effectue un vol de la ville A à la ville B en passant par la ville C et la ville D. La présence de l'avion est détectée par des tours de contrôle (superviseurs) : l'avion doit effectuer ce vol entre 3h et 5h.

- Si les durées de vol de l'avion n'appartiennent pas aux intervalles mentionnées, il est possible que l'avion arrive en B avec un certain retard.

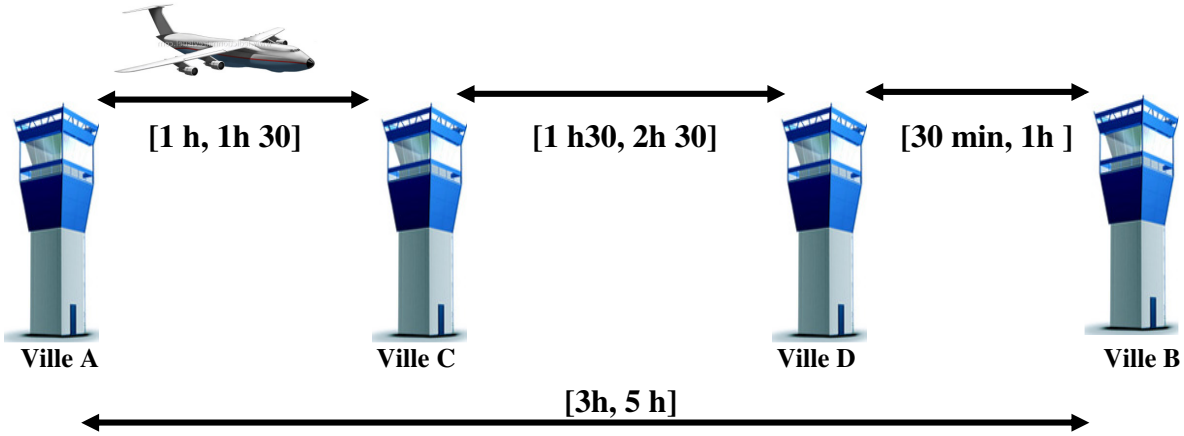


Figure IV.25 : Trajet d'un avion de Ville A vers Ville B

- Supposons que l'avion prend 2h 15min pour arriver de A à C et Δ∈ [1h 30+30 min, 2h 30 +1h]), la possibilité que le vol entre A et B soit retardée est de 0.5 (figure IV.26).

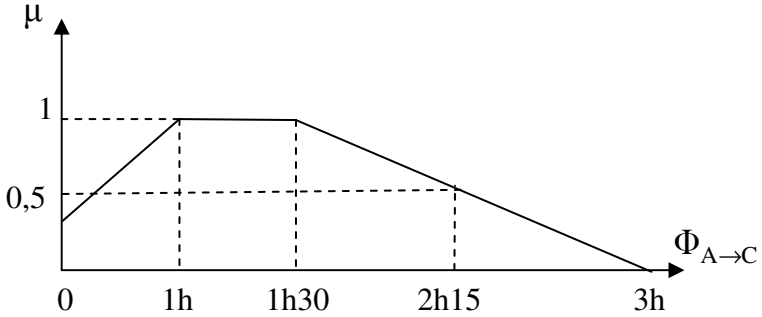


Figure IV.26 : Fonction de possibilité associée à $\Phi_{A \to C}$

- Si le vol entre la Ville C et la Ville D, prend 2h 20 min, on peut confirmer que le vol entre la Ville A et la Ville B sera retardé (figure IV.27).

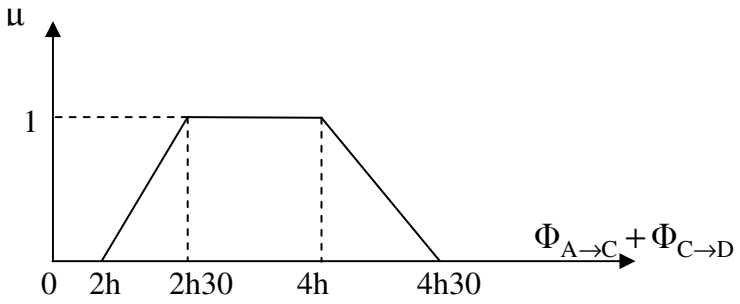


Figure IV.27 : Fonction de possibilité, Δ∈ [30min,1h]

IV.4.2.5 Application de l'approche de surveillance distribuée à une chaîne de fabrication de lait

A/ Introduction

Dans le cadre de la surveillance distribuée, nous nous intéressons exclusivement aux capteurs qui sont à l'origine de l'information nécessaire aux mécanismes de surveillance [JEO, 06]. A chaque zone physique est associé un superviseur (figure IV.28) qui réalise les fonctionnalités de la détection à savoir l'identification d'un symptôme de défaillance dans la zone considérée au moyen de la réception d'un sous-ensemble d'événements $\Sigma_i \subset \Sigma$, c'est à dire les événements directement issus des capteurs de la zone surveillée [MHA, 09]. Ces superviseurs doivent s'échanger les occurrences de certains événements afin de pouvoir vérifier des contraintes globales (de type intervalles par exemple).

A-1 / Notations

$e_{C1\to M1}$: Fin de transfert des bouteilles du stock C_1 à la remplisseuse M_1 (superviseur S_1)
e_{M1} : Opération de remplissage terminée (superviseur S_2).
$e_{M1\to M2}$: Fin de transfert des bouteilles de la remplisseuse M_1 à la capsuleuse M_2 (superviseur S_3).
e_{M2} : Opération de capsulage terminée (superviseur S_4).
$e_{M2\to M3}$: Fin de transfert des bouteilles de la capsuleuse M_2 au dateur M_3 (superviseur S_5).
e_{M3} : Opération de pointage terminée (superviseur S_6).
$e_{M3\to M4}$: Fin de transfert des bouteilles du dateur M_3 à l'Hydromat M_4 (superviseur S_7).
e_{M4} : Opération de stérilisation terminée (superviseur S_8).
$e_{M4\to M5}$: Fin de transfert des bouteilles de l'Hydromat M_4 à l'étiqueteuse M_5 (superviseur S_9).
e_{M5} : Opération d'étiquetage terminée (superviseur S_{10}).
$e_{M5\to M6}$: Fin de transfert des bouteilles de l'étiqueteuse M_5 à l'emballeuse M_6 (superviseur S_{11}).
e_{M6} : Opération d'emballage terminée (superviseur S_{12}).
$e_{M6\to SA}$: Fin de transfert des bouteilles de l'emballeuse M_6 au stock SA (superviseur S_{13}).

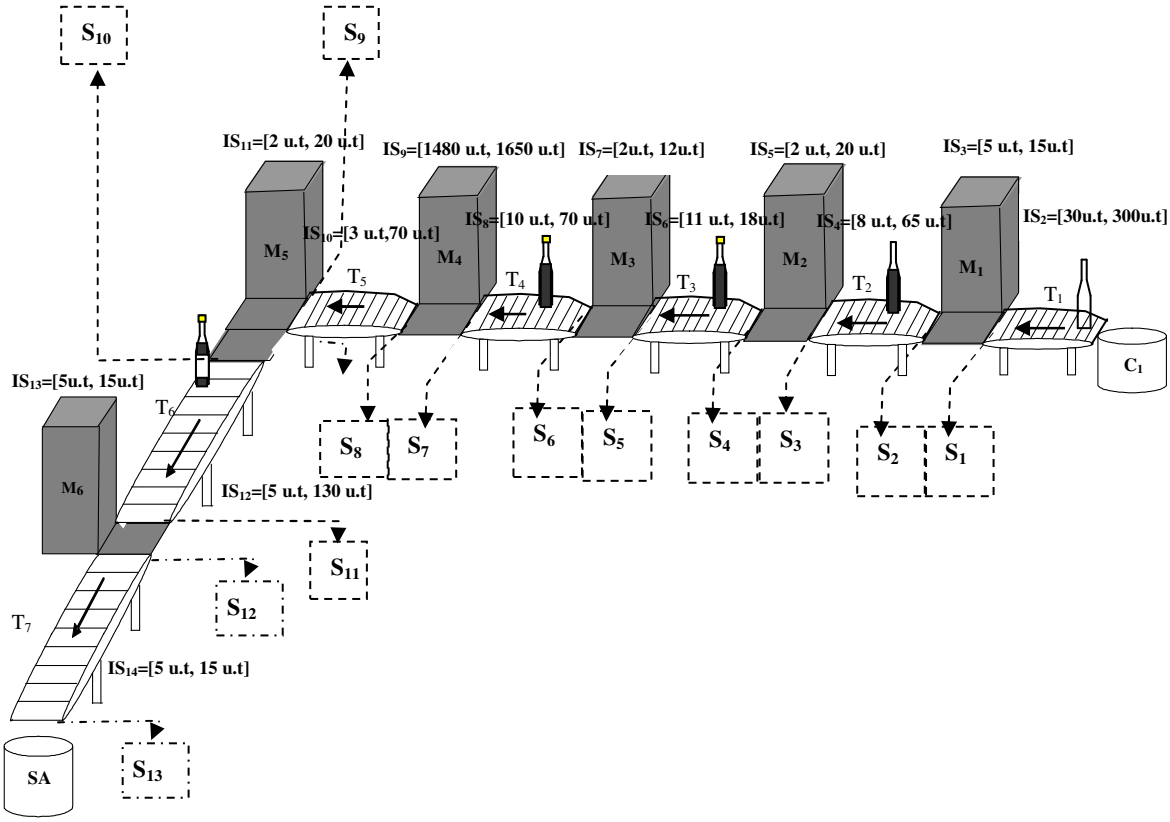


Figure IV.28 : Emplacement des superviseurs associés à l'atelier de production laitière [MHA, 09]

La figure IV.28 donne les tolérances sur les durées opératoires ($[a_i, b_i]$ associées à chaque opération (remplissage, capsulage, transfert, …), quand ces durées sont incluses dans les intervalles mentionnées, le cycle de fabrication des bouteilles de 1000 ml s'étant bien déroulé. Si non (les durées en dehors des intervalles), il est possible, mais pas obligatoire, de retarder le cycle de fabrication d'une bouteille [MHA, 10c].

A-2/ Vérification de la contrainte globale $C_{C1\rightarrow M1,\, M6\rightarrow SA}$

La vérification de la contrainte temporelle liant les événements $e_{C1\rightarrow M1}$ (fin de transfert des récipients du stock C_1 au remplisseuse M_1) et $e_{M6\rightarrow SA}$ (fin de transfert des bouteilles de l'emballeuse M_6 au stock SA) est réalisée à chaque fois qu'un événement succédant à $e_{C1\rightarrow M1}$, e_{M1}, …, $e_{M6\rightarrow SA}$ se produit, tout en tenant compte des durées mesurées respectives :
$\Phi_{C1\rightarrow M1}$, Φ_{M1}, $\Phi_{M1\rightarrow M2}$, Φ_{M2}, $\Phi_{M2\rightarrow M3}$, Φ_{M3}, $\Phi_{M3\rightarrow M4}$, Φ_{M4}, $\Phi_{M4\rightarrow M5}$, Φ_{M5}, $\Phi_{M5\rightarrow M6}$, Φ_{M6} et $\Phi_{M6\rightarrow SA}$

La contrainte liant l'événement $e_{C1\rightarrow M1}$ à $e_{M6\rightarrow SA}$ est de type intervalles définie par :

$$C_{C1\rightarrow M1,\, M6\rightarrow SA} : d_{C1\rightarrow M1,\, M6\rightarrow SA} \leq O(e_{C1\rightarrow M1}) - O(e_{M6\rightarrow SA}) \leq f_{C1\rightarrow M1,\, M6\rightarrow SA} \qquad \text{IV.6}$$

Pour l'atelier étudié, on a :

$$d_{C1\rightarrow M1,\, M6\rightarrow SA} = \sum_{i=2}^{14} a_i$$

Le temps minimum ($d_{C1\rightarrow M1,\ M6\rightarrow SA}$) accordé à la fabrication d'une bouteille de lait est de 1568 u.t., alors que le temps maximum ($f_{C1\rightarrow M1,\ M6\rightarrow SA}$) est de 2400 u.t.

$$f_{C1\rightarrow M1,\ M6\rightarrow SA} = \sum_{i=2}^{14} b_i$$

B/ Détection distribuée basée sur l'incertitude des temps de séjour q_i

La figure IV.29, montre les tolérances sur les temps de séjour effectifs q_i, dans un GEV P-temporel, modélisant le processus de fabrication considéré. Rappelons qu'il s'agit d'un atelier à une gamme de production, caractérisé par un fonctionnement répétitif et avec postes d'assemblage.

L'idée de chercher de mettre en œuvre un modèle de détection, dont l'évolution est basée seulement sur les temps de séjour des jetons dans les places p_i, représente l'originalité de ce travail. Seul les temps de séjour effectifs q_i seront utilisés pour la détection.

Remarque

Les temps de séjour effectifs associés aux places représentant les machines non utilisées ($p_i \in R_N$) et aux places de transfert non chargées ($p_i \in Trans_{NC}$), ne sont pas considérés dans le module de détection distribuée.

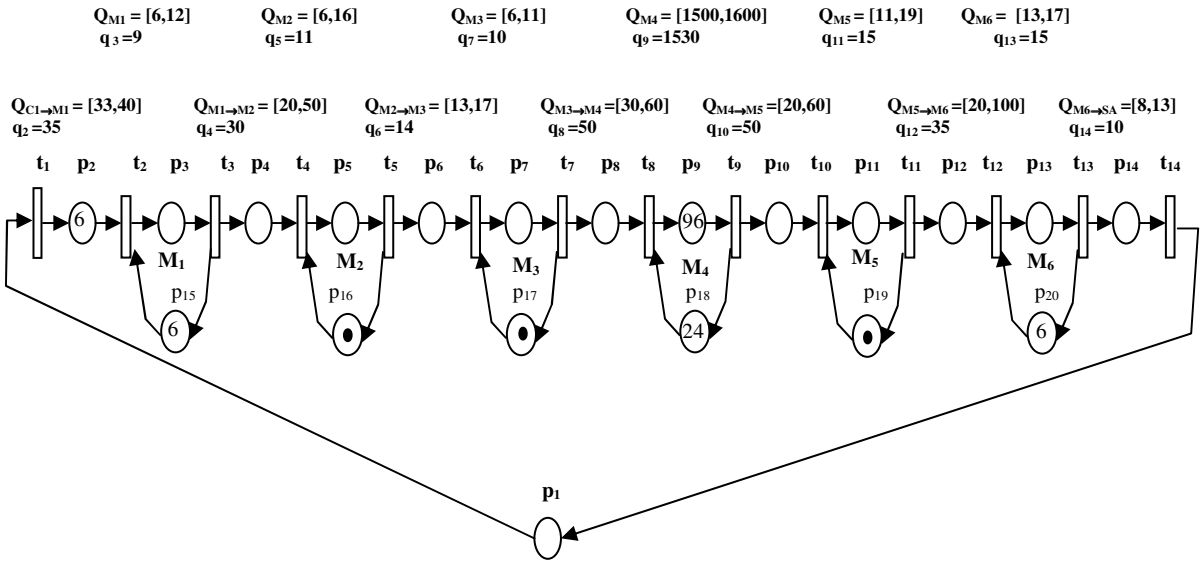


Figure IV.29 : Incertitudes sur les temps de séjour effectifs q_i

B-1/ Détermination de l'ensemble des temps de séjours

$Q_{C1\rightarrow M1}$: Intervalle d'incertitude sur le temps de séjour effectif (q_2) associé à l'opération de transfert des bouteilles du stock C_1 à la remplisseuse M_1 ($Q_{C1\rightarrow M1} = [q_{2min}, q_{2max}]$).

Q_{M1} : Intervalle d'incertitude sur le temps de séjour effectif (q_3) associé à l'opération de remplissage ($Q_{M1} = [q_{3min}, q_{3max}]$).

$Q_{M1\rightarrow M2}$: Intervalle d'incertitude sur le temps de séjour effectif (q_4) associé à l'opération de transfert des bouteilles de la remplisseuse M_1 au capsuleuse M_2 ($Q_{M1\rightarrow M2} = [q_{4min},$

q_{4max}]).

Q_{M2} : Intervalle d'incertitude sur le temps de séjour effectif (q_5) associé à l'opération de capsulage ($Q_{M2} = [q_{5min}, q_{5max}]$).

$Q_{M2\rightarrow M3}$: Intervalle d'incertitude sur le temps de séjour effectif associé (q_6) à l'opération de transfert des bouteilles de la capsuleuse M_2 au dateur M_3 ($Q_{M2\rightarrow M3} = [q_{6min}, q_{6max}]$).

Q_{M3} : Intervalle d'incertitude sur le temps de séjour effectif (q_7) associé à l'opération de pointage ($Q_{M3} = [q_{7min}, q_{7max}]$).

$Q_{M3\rightarrow M4}$: Intervalle d'incertitude sur le temps de séjour effectif (q_8) associé à l'opération de transfert des bouteilles du dateur M_3 à l'Hydromat M_4 ($Q_{M3\rightarrow M4} = [q_{8min}, q_{8max}]$).

Q_{M4} : Intervalle d'incertitude sur le temps de séjour effectif (q_9) associé à l'opération de stérilisation ($Q_{M4} = [q_{9min}, q_{9max}]$).

$Q_{M4\rightarrow M5}$: Intervalle d'incertitude sur le temps de séjour effectif (q_{10}) associé à l'opération de transfert des bouteilles de l'Hydromat M_4 à l'étiqueteuse M_5 ($Q_{M4\rightarrow M5} = [q_{10min}, q_{10max}]$).

Q_{M5} : Intervalle d'incertitude sur le temps de séjour effectif (q_{11}) associé à l'opération d'étiquetage ($Q_{M5} = [q_{11min}, q_{11max}]$).

$Q_{M5\rightarrow M6}$: Intervalle d'incertitude sur le temps de séjour effectif (q_{12}) associé à l'opération de transfert des bouteilles de l'étiqueteuse M_5 à l'emballeuse M_6 ($Q_{M5\rightarrow M6} = [q_{12min}, q_{12max}]$).

Q_{M6} : Intervalle d'incertitude sur le temps de séjour effectif (q_{13}) associé à l'opération d'emballage ($Q_{M6} = [q_{13min}, q_{13max}]$).

$Q_{M6\rightarrow SA}$: Intervalle d'incertitude sur le temps de séjour effectif (q_{14}) associé à l'opération de transfert des bouteilles de l'emballeuse M_6 au stock SA ($Q_{M6\rightarrow SA} = [q_{14min}, q_{14max}]$).

B-2/ Vérification de la contrainte $Q_{C1\rightarrow M1,\, M6\rightarrow SA}$

La vérification de la contrainte temporelle liant les événements $e_{C1\rightarrow M1}$ (fin de transfert des récipients du C_1 à la remplisseuse M_1) et $e_{M6\rightarrow SA}$ (fin de transfert des bouteilles de l'emballeuse M_6 au stock SA) est réalisée en tenant compte des intervalles d'incertitudes associés aux différentes opérations :

$Q_{C1\rightarrow M1}$, Q_{M1}, $Q_{M1\rightarrow M2}$, Q_{M2}, $Q_{M2\rightarrow M3}$, Q_{M3}, $Q_{M3\rightarrow M4}$, Q_{M4}, $Q_{M4\rightarrow M5}$, Q_{M5}, $Q_{M5\rightarrow M6}$, Q_{M6} et $Q_{M6\rightarrow SA}$.

La contrainte, $Q_{C1\rightarrow M1,M6\rightarrow SA}$ liant les événements $e_{C1\rightarrow M1}$ à $e_{M6\rightarrow SA}$ est de type intervalle définie par :

$$Q_{C1\rightarrow M1,\, M6\rightarrow SA} : Q_{min} \leq O(e_{C1\rightarrow M1}) - O(e_{M6\rightarrow SA}) \leq Q_{max} \qquad \text{IV.7}$$

Pour l'atelier étudié, on :

$$Q_{min} = \sum_{i=2}^{14} q_{i\,min}$$

Le temps minimum Q_{min} de séjour d'un jeton dans une place p_i est 1686 u.t. alors que le temps maximum Q_{max} est de 2015 u.t.

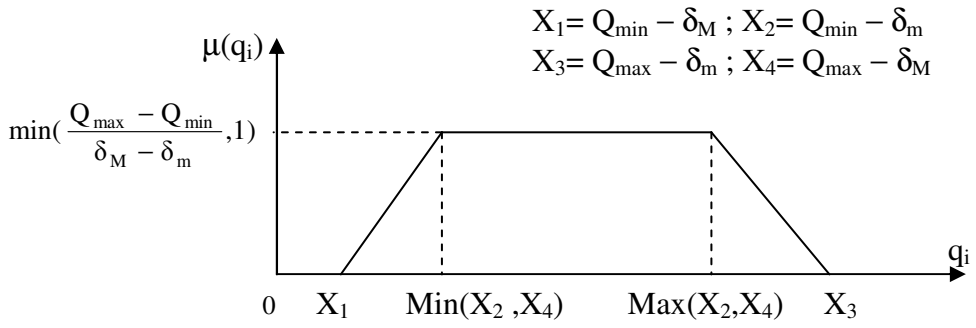
$$Q_{max} = \sum_{i=2}^{14} q_{i\,max}$$

C/ Exemples

C-1/ Exemple 1 : Cas d'un retard de la durée de transfert de C_1 à la remplisseuse M_1 [MHA, 10c]

La figure IV.30**,** représente la possibilité de vérifier la contrainte $Q_{C1\rightarrow M1,\ M6\rightarrow SA}$ en fonction de la durée de l'opération de transfert des bouteilles du stock C_1 à la remplisseuse M_1 (q_2) et compte tenu du délai $\Delta \in [1653, 1975]$ [MHA, 10c].

Rappelons que la fonction d'appartenance d'un ensemble flou dans le cas d'une contrainte de type intervalle est donnée dans figure suivante :



Pour notre cas, on a :

$X_1 = Q_{min} - \delta_M = -289$ u.t. (1686 – 1975); $X_2 = Q_{min} - \delta_m = 33$ u.t. (1686 –1653);
$X_3 = Q_{max} - \delta_m = 362$ u.t. (2015 – 1653); $X_4 = Q_{max} - \delta_M = 40$ u.t. (2015 – 1975) ;

Il vient les résultats de la figure IV.30 :

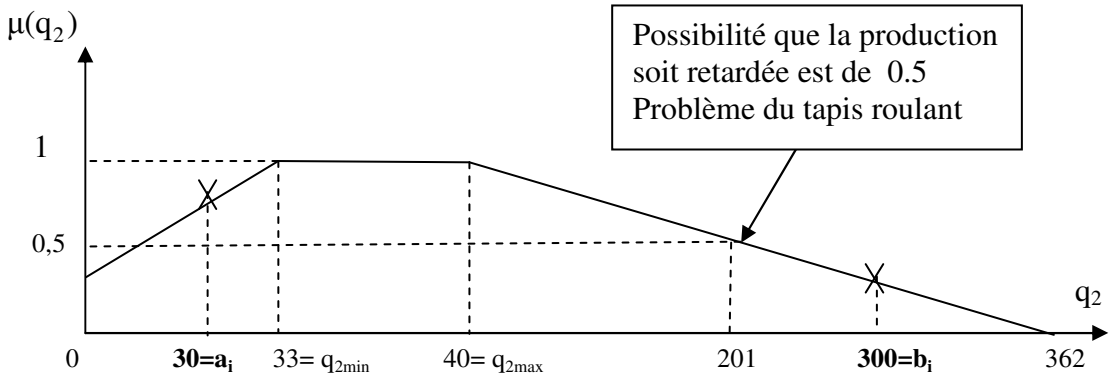


Figure IV.30 : Fonction de possibilité de la variable floue q_2

Supposons que le temps de séjour associé à l'opération de transfert des bouteilles de C_1 à la remplisseuse M_1 est de 201 u.t (q_2= 201 u.t. et $q_2 \in [a_i, b_i]$), dans ce cas on peut conclure que :

- la possibilité que la production soit retardée est de 0.5, cependant la qualité du produit est correcte,
- le temps de transfert des bouteilles de C_1 vers la remplisseuse M_1 est retardé de 161 u.t. ; Ce retard étant important, on peut conclure qu'il y'a un problème au niveau du tapis

roulant. Ce problème doit être signalé aux agents de maintenance et une action de maintenance doit être prévue.

C-2/ Exemple 2 : Cas d'un retard de l'opération de l'emballage [MHA, 10c]

On pose

$$q_{C1\rightarrow M6} = \sum_{i=2}^{13} q_i$$

Avec :

q_2 = 201 u.t. ; q_3 = 9 u.t. ; q_4 = 30 u.t; q_5 = 11 u.t. ; q_6 = 14 u.t.; q_7= 10 u.t. ; q_8 = 50 u.t. ; q_9 = 1530 u.t. ; q_{10} = 50 u.t. ; q_{11}= 15 u.t. ; q_{12} = 35 u.t. ; q_{13} = 25 u.t.

Supposons maintenant que le temps de séjour effectif associé à l'opération de l'emballage est de 25 u.t.(q_{13} =25 u.t.). En effet, pour un retard de transfert des bouteilles de 161 u.t. du C_1 à la remplisseuse M_1 (q_2 =201 u.t.) et pour un retard de l'opération de l'emballage de 8 u.t. (q_{13} = 25 u.t), on est sûr le cycle de production, figure IV.31, va être retardé et qu'une violation de la contrainte de type intervalle est présente ($Q_{C1\rightarrow M1, M6\rightarrow SA}$: $1686 \leq O(e_{C1\rightarrow M1}) - O(e_{M6\rightarrow SA}) \leq 2015$).

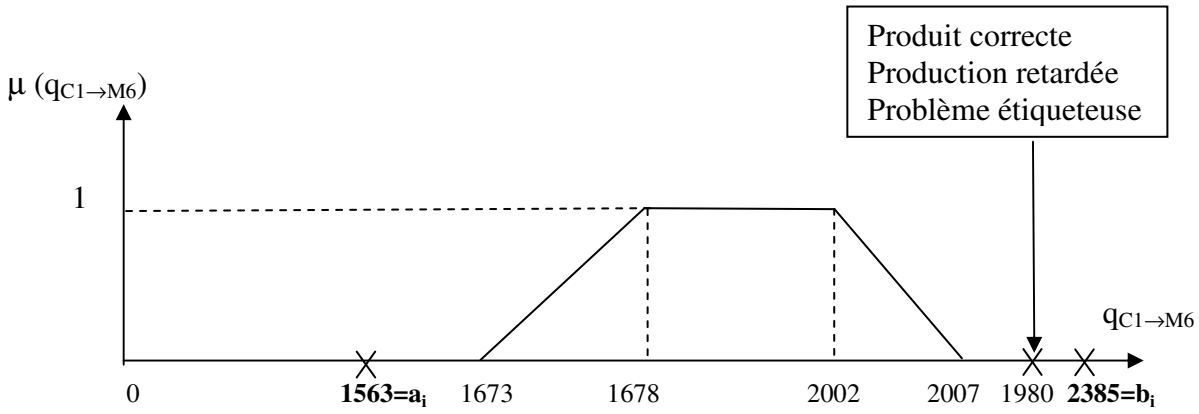


Figure IV.31: Fonction de possibilité avec $\Delta \in$ [8, 13], considérant $q_{C1\rightarrow M6}$

Pour notre cas

[$X_1 = Q_{min} - \delta_M$ = 1673 u.t (1686– 13); $X_2 = Q_{min} - \delta_m$ = 1678 u.t (1686 – 8);
$X_3 = Q_{max} - \delta_m$ = 2007 u.t (2015 – 8); $X_4 = Q_{min} - \delta_M$ = 2002 u.t (2015 – 13)];

Dans ce cas on peut conclure que :

- la production est retardée quelque soit la durée de transfert de M_6 vers le stock des produits finis SA,
- le produit est correct même si on a un retard à l'entrée de la remplisseuse M_1 et un retard au niveau de l'emballeuse M_6,
- le retard au niveau de l'emballeuse vient d'une défaillance technique, nécessitant d'effectuer une opération de diagnostic.

IV.4.2.6 Conclusion

La fonction de détection caractérise le fonctionnement anormal du système. Les anomalies distinguées représentent les situations pour lesquelles le comportement du système devient anormal puisqu'on sort du modèle incertain du comportement normal [MHA, 10c].

La détection permet donc, l'identification des changements ou déviations du procédé par rapport au fonctionnement normal ; ce qui se traduit par la génération des symptômes de défaillances.

La phase de détection est suivie par la fonction diagnostic qui consiste à déterminer l'origine et/ou la (les) cause(s) qui ont pu engendrer le symptôme détecté. A ce stade, le système doit avoir la capacité de décider quand le procédé se trouve dans une situation de fonctionnement normal, et quand une action corrective doit être appliquée.

IV.4.3 Module du diagnostic

IV.4.3.1 Introduction

La fonction diagnostic établit un lien de cause à effet entre un symptôme observé et la défaillance survenue, ses causes et ses conséquences. La communauté des SED distingue trois sous-fonctions [COM, 00] :

- la localisation, qui détermine le sous-système responsable de la défaillance,
- l'identification, qui détermine les causes qui ont engendré la défaillance,
- l'explication, qui justifie les conclusions du diagnostic.

La littérature sur le diagnostic de défaillances dans les processus industriels est vaste, s'étendant des méthodes analytiques à l'intelligence artificielle et aux méthodes statistiques. D'un point de vue de modélisation, des méthodes de diagnostic ont besoin de modèles précis du processus, de modèles semi-quantitatifs ou bien de modèles qualitatifs. Par ailleurs, d'autres méthodes n'utilisent aucune forme de modèle, et s'appuient seulement sur des données historiques du processus.

IV.4.3.2 Classification des méthodes de diagnostic

Une classification de ces différentes méthodes de diagnostic est proposée dans [VEN, 03]. Cette classification a été faite selon la connaissance du processus disponible. D'autres maniéres de classer les diverses méthodes et techniques de diagnostic ont été proposées dans [ZWI, 95].

- **Méthodes à base de modèles**

Dans le domaine de l'automatique et de la supervision des processus, la conception et l'utilisation des modèles mathématiques (modèle qualitatif, modèle quantitatif ou semi quantitatif, systèmes flous) précis pour la détection et le diagnostic sont bien connues. Mais, dans beaucoup de cas, la construction d'un tel modèle est très difficile, à cause de la nature complexe ou non-linéaire du processus lui-même, des paramètres variables dans le temps ou du manque de mesures disponibles.

– **Méthodes à base de connaissances**

Face à la difficulté de construction d'un modèle de diagnostic, il est démontré que l'opérateur humain peut fournir une meilleure supervision en utilisant sa propre connaissance et son expérience pour assurer le bon fonctionnement du processus. De ce fait, les connaissances de l'expert sur la structure et le comportement du processus sont exploitées par diverses techniques dont on cite :

– AMDEC (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leurs criticités),
– arbre de défaillances (ADD),
– Systèmes experts.

Nous nous intéressons aux méthodes de diagnostic à base de connaissances. Parmi ces méthodes, issues des études de risques et de sûreté de fonctionnement, qui peuvent être utilisées pour identifier les causes des défaillances de processus industriels, la méthode des arbres de défaillances retenue dans ce qui suit. Le but est d'intégrer l'incertitude dans le modèle utilisé pour le diagnostic.

IV.4.3.3 Arbres de défaillances (ou arbres de Causes)

L'arbre de défaillances est l'un des outils majeurs d'analyse du risque technologique, développé au début des années 1960 aux Etats-Unis. C'est la méthode la plus couramment utilisée dans les analyses de fiabilité, de disponibilité ou de sécurité des systèmes.

Il s'agit d'une méthode optimisée qui permet la détermination des chemins critiques dans un système. Cette méthode a pour objet de déterminer les diverses combinaisons possibles d'événements qui entraînent la réalisation d'un événement indésirable (EI) unique [SAL, 07b]. Elle permet donc d'identifier les points faibles de la conception.

C'est une méthode déductive dont la représentation graphique des combinaisons est réalisée par une structure arborescente (arbre), permettant un traitement à la fois qualitatif et quantitatif.

Cet arbre est établi sous forme d'un diagramme logique et comporte au sommet l'événement indésirable [SAL, 07b]. Les causes immédiates qui produisent cet événement sont ensuite hiérarchisées à l'aide de symboles logiques "ET" et "OU". De cette façon, l'arbre est créé pas à pas pour atteindre, à la base, un ensemble d'événements considérés comme élémentaires. Une extension des arbres de défaillances est la méthode du diagramme de causes-conséquences. Cette méthode combine les principes utilisés par l'analyse déductive de l'arbre des défaillances et l'analyse inductive de l'arbre des conséquences.

Pour exécuter un diagnostic correct, d'un système de production, à partir des arbres de défaillances, ceux-ci doivent largement représenter toutes les relations causales du processus, c'est-à-dire qu'ils doivent être capables d'expliquer tous les scénarios de défauts possibles.

La section suivante est dédiée à l'étude de l'impact des imprécisions des taux de défaillances dans un atelier de production laitière. Cette imprécision est modélisée par des arbres de causes floues.

La problématique, posée dans ce qui suit, est la construction de l'arbre de défaillance d'un atelier de production laitière et le calcul de la probabilité d'occurrence de l'événement indésirable de l'arbre sachant qu'on ne dispose pas de lois de probabilités précises d'occurrence de chaque événement de base. Cette situation est considérée lorsque les données concernant les événements de base sont définies de façon imprécise ou lors de la prise en compte d'informations non numériques comme le jugement d'un expert.

Pour ces raisons, une nouvelle approche (approche floue de Buckley) de calcul de la probabilité d'occurrence de l'événement sommet de l'arbre de défaillance d'un atelier manufacturier de production laitière, est utilisée. Les probabilités élémentaires des arbres de défaillances sont remplacées par des nombres flous permettant aux experts fiabilistes d'exprimer leurs incertitudes dans l'énoncé des valeurs de probabilités de défaillances et autres paramètres du système. Nous montrons comment l'imprécision sur les valeurs de paramètres caractéristiques tel que le taux de défaillance induit des variations particulièrement significatives sur l'occurrence de l'événement sommet de l'arbre. Rappelons que l'occurrence d'une défaillance est un élément particulièrement sensible dans l'agroalimentaire à contraintes de temps, puisque le moindre décalage temporel peut occasionner une production impropre.

IV.4.3.4 Impact de l'imprécision des taux de défaillances dans un atelier manufacturier de production laitière

Les premiers travaux d'analyse des arbres de défaillances, basés sur la logique floue, appartiennent à Tanaka et al. [TAN, 83]. Les probabilités d'occurrences des événements de base ont été représentées par des nombres flous trapézoïdaux, et les opérations d'addition et de multiplication floues ont été utilisées pour calculer la probabilité d'occurrence de l'événement sommet. Singer [SIN, 90] a associé aux fréquences d'occurrences des événements de base des nombres flous du type L-R et a utilisé les mesures de possibilités pour évaluer la distribution de possibilités de l'événement sommet.

Soman et Misra [SOM, 93] ont proposé une méthode connue sous le nom de l'identité de résolution, basée sur la méthode des α-coupes, pour traiter les arbres comportant des évènements répétés. Cette méthode a été complétée par la suite, pour traiter les arbres à plusieurs états de fonctionnement. Hung et al. [HUA, 04] ont représenté les probabilités d'occurrences des événements de base par des nombres flous de type L-R en ajoutant des poids subjectifs qui représentent le degré de confiance associé aux informations données par les experts. Walley [WAL, 91] a introduit les probabilités supérieures et inférieures qui apparaissent comme un outil intéressant dans les études de fiabilité. Dans [COO, 94] a été proposée une approche d'analyse de fiabilité bayésienne basée sur les probabilités imprécises. Kozine et Filiminov [KOZ, 00] ont utilisé les probabilités supérieures et inférieures pour définir un encadrement de la valeur supérieure de la fiabilité de quelques systèmes simples.

Des compléments d'informations sur l'utilisation des arbres de défaillances flous peuvent être trouvés dans [FEN, 06], [HAL, 07] et [GRE, 08].

A/ Arbre de défaillances flous

La méthode des arbres de défaillances est aujourd'hui l'une des méthodes les plus utilisées dans les analyses de sûreté de fonctionnement des systèmes. Elle a pour objectif le recensement des causes entraînant l'apparition des événements indésirables et le calcul de leurs

probabilités d'occurrence. Elle constitue un moyen de représentation de la logique des défaillances et d'identification des points faibles de la conception [SAL, 07a].

Les opérateurs les plus souvent utilisés sont les opérateurs logiques "ET" et "OU". Néanmoins, d'autres opérateurs existent, tels que l'opérateur de condition, ou encore l'opérateur m/n.

On désignera par taux de défaillance d'un événement "i", le taux de défaillance du composant "i" (λ_i) associé à cet événement. En particulier, le taux de défaillance de l'événement sommet de l'arbre désignera le taux de défaillance du système complet.

A-1/ Contexte de l'étude

Les composants du système étudié sont considérés non réparables. Dans cette étude, nous considérons les distributions, de probabilités d'occurrences des événements de base comme des distributions exponentielles.

Définition IV.1

La fiabilité d'un composant "i " est définie par:

$$R_i(t)=\exp(-\lambda_i\, t) \qquad \text{IV.8}$$

où λ_i est le taux de défaillance du composant "i".

Définition IV.2

Dans un arbre de défaillances, constitué de portes "OU", la probabilité de défaillance de l'événement sommet de l'arbre est donnée par [SAL, 07b]:

$$P_y(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - P_i(t)) = 1 - \prod_{i=1}^{n} \exp(-\lambda_i.t) \qquad \text{IV.9}$$

où n est le nombre d'événements de base, $P_i(t)$ la probabilité de défaillance du $i^{ème}$ événement de base et $P_y(t)$ la probabilité d'occurrence de l'événement sommet.

Définition IV.3

La probabilité de défaillance de l'événement sommet y d'un arbre de défaillances, constitué uniquement de portes "ET" est donnée par [SAL, 07b] :

$$P_y(t) = \prod_{i=1}^{n} P_i(t) = \prod_{i=1}^{n} (1 - \exp(-\lambda_i.t)) \qquad \text{IV.10}$$

A-2/ Analyse des arbres de défaillances floues

L'analyse des arbres de défaillances conventionnelles est basée sur l'approche probabiliste. La probabilité d'occurrences de l'événement sommet (probabilité de défaillance du

système complet) est calculée à partir des probabilités d'occurrences des événements élémentaires (probabilités de défaillance des composants du système) en utilisant les opérations arithmétiques classiques. Les probabilités de défaillance des composants sont calculées à partir de leurs taux de défaillance. Cependant, dans certains cas, il est difficile d'obtenir une quantité suffisante de données pour évaluer les taux de défaillance des composants du système d'une manière précise.

Le problème de précision sur les taux de défaillance ou de réparation existe lorsqu'on travaille avec de nouveaux composants. Dans ce cas, les experts ou les concepteurs fournissent des estimations imprécises des taux caractéristiques des composants. Les fiabilistes peuvent, dans certains cas, fournir des informations imprécises sous la forme d'intervalles ou une série d'intervalles emboîtés liés au niveau de confiance α sur la connaissance qu'ils formalisent. Il s'agit en fait d'un nombre flou au sens de Zadeh.

A-2-1/ Nombres flous

Définition IV.4

Un sous-ensemble flou A sur un référentiel Ω est caractérisé par une fonction d'appartenance μ_A qui associe à chaque élément x de Ω un nombre réel dans l'intervalle [0, 1] :

$$\mu_A : \Omega \rightarrow [0, 1]$$

La valeur $\mu_A(x)$ représente le degré d'appartenance de x à A.

Définition IV.5

Soit x une variable réelle continue de fonction d'appartenance $\mu(x) \in [0, 1]$, et qui satisfait aux conditions suivantes [ZAD, 89]:

- $\mu(x)$ est continue par morceaux,
- $\mu(x)$ est convexe,
- $\mu(x)$ est normale (il existe au moins une valeur x_0 telle que ($\mu(x_0)=1$).

L'ensemble flou dont la fonction d'appartenance satisfait à ces conditions est appelé nombre flou.

Définition IV.6

Soient trois paramètres (m, a, b), a et b étant strictement positifs, et deux fonctions notées L et R, définies sur l'ensemble IR^+ des réels positifs à valeurs dans [0,1], semi continues, telles que [SAL, 07b]:

$$L(0) = R(0) = 1,\ L(1) = 0 \text{ où } L(x) > 0\ \forall x \quad \text{avec : } \lim_{x \rightarrow +\infty} L(x) = 0 \qquad \text{IV.11}$$

$$R(1)=0 \text{ ; où } R(x)>0\ \forall x \text{ avec : } \lim_{x \rightarrow +\infty} R(x) = 0 .$$

Un nombre flou M est de type L-R si sa fonction d'appartenance f_M est définie par :

$$f_M(x)=\begin{cases} R((x-m)/b) & \text{si } x>m \\ L((m-x)/a) & \text{si } x\leq m \end{cases} \qquad \text{IV.12}$$

Nous notons $M=(m, a, b)_{LR}$ un nombre flou de type L-R, figure IV.32, avec :

- m est sa valeur modale avec $f_M(m)=1$,
- a est la largeur de son support à gauche de m, encore appelée étalement gauche sur l'axe des réels
- b est la longueur de son support à droite de m, encore appelée étalement droit sur l'axe des réels
- L et R sont les deux fonctions qui déterminent sa fonction d'appartenance respectivement à gauche et à droite de m

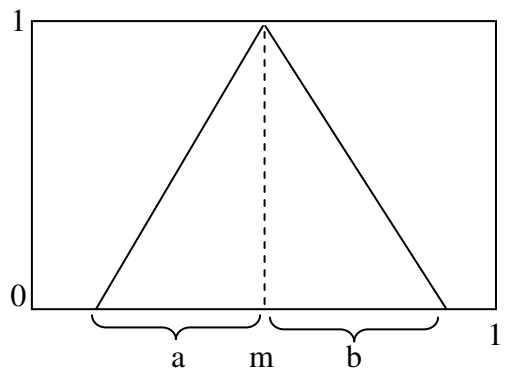


Figure IV.32: Nombre flou du type L-R

Sur l'axe des réels, figure IV.33, L et R sont les deux fonctions qui déterminent la fonction d'appartenance $\mu_{\tilde{A}}(x)$ respectivement à gauche et à droite de m. L'intérêt des nombres flous de type L-R est de pouvoir représenter aussi bien des valeurs singulières, des intervalles que des nombres flous [SAL, 07b].

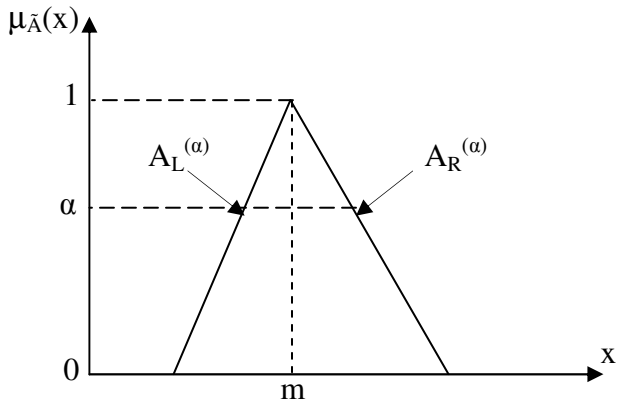


Figure IV.33: α-coupes d'un nombre flou

Il est à noter que des formes plus complexes que celle caractérisée par l'équation (IV.12) peuvent être modélisées si l'expert est capable de l'exprimer. Les formes doivent respecter les propriétés des nombres flous, énoncées précédemment.

Nous pouvons caractériser un nombre flou triangulaire par un intervalle de confiance à un certain niveau α. En effet, si nous considérons un nombre flou $\tilde{A}$ de fonction d'appartenance $\mu_{\tilde{A}}(x)$, on obtient plusieurs intervalles emboîtés en utilisant la méthode des α−coupes.

$A_L^{(\alpha)}$ et $A_R^{(\alpha)}$ représentent respectivement les limites gauche et droite de la fonction d'appartenance $\mu_{\tilde{A}}(x)$ à chaque α−coupe. A partir de la figure IV.33, on peut représenter un nombre flou en utilisant l'expression suivante :

$$\tilde{A} \rightarrow [\, A_L^{(\alpha)} , A_R^{(\alpha)}] \text{ avec } 0 \leq \alpha \leq 1 \qquad \text{IV.13}$$

Définition IV.7

Une probabilité floue est un ensemble flou défini dans l'espace des probabilités. Elle représente un nombre flou entre 0 et 1 qui est affecté à la probabilité d'occurrence d'un événement.

A-2-2/ Approche de Buckley

Une extension des approches classiques à la prise en compte de l'imprécision est proposée par Buckley. Elle s'inspire du principe d'extension des ensembles classiques aux ensembles flous, proposé par Zadeh.

Soit $y = f(x_1, x_2,\ldots, x_n)$ une fonction déterministe qui associe une variable numérique de sortie à n variables numériques d'entrée, combinées entre elles par des opérateurs algébriques classiques (+, −, ×, ÷). Le principe d'extension de Zadeh consiste à considérer chacune des variables d'entrée comme un nombre flou ($\tilde{A}_1$, $\tilde{A}_2$,…, $\tilde{A}_n$) et à les combiner entre elles par une extension max-min des opérateurs algébriques classiques.

Si $\tilde{B}$ est l'image par une fonction f des sous-ensembles flous ($\tilde{A}_1$, $\tilde{A}_2$, …, $\tilde{A}_n$), alors la fonction d'appartenance de $\tilde{B}$ est donnée par :

$$\mu_{\tilde{B}}(y) = \sup_{(x_1, x_2,\ldots, x_n) | y = f(x_1, x_2,\ldots, x_n)} \{\min \{ \mu_{\tilde{A}_1}(x_1), \mu_{\tilde{A}_2}(x_2),\ldots, \mu_{\tilde{A}_n}(x_n) \}$$

L'approche proposée par Buckley [BUC, 02], consiste à associer aux variables d'entrée des nombres flous et à les combiner de manière séquentielle, en utilisant la notion de α−coupe qui ramène le problème à un calcul d'intervalles. Considérons deux nombres flous $\tilde{X}$ et $\tilde{Y}$, représentés respectivement par les intervalles $[X_L^{(\alpha)}, X_R^{(\alpha)}]$ et $[Y_L^{(\alpha)}, Y_R^{(\alpha)}]$.

Les opérations arithmétiques, appliquées aux intervalles, donnent les expressions suivantes [SAL, 07b]:

$$\tilde{Z} = \tilde{X} + \tilde{Y} \rightarrow [Z^{(\alpha)}_L, Z^{(\alpha)}_R] = [X^{(\alpha)}_L + Y^{(\alpha)}_L, X^{(\alpha)}_R + Y^{(\alpha)}_R] \qquad \text{IV.14}$$

$$\tilde{Z} = \tilde{X} - \tilde{Y} \rightarrow [Z^{(\alpha)}_L, Z^{(\alpha)}_R] = [X^{(\alpha)}_L - Y^{(\alpha)}_R, X^{(\alpha)}_R - Y^{(\alpha)}_L] \qquad \text{IV.15}$$

$$\tilde{Z} = \tilde{X}.\tilde{Y} \rightarrow [Z^{(\alpha)}_L, Z^{(\alpha)}_R] \qquad \text{IV.16}$$

$$\text{avec : } \begin{cases} \tilde{Z}_L^{(\alpha)} = \min(X^{(\alpha)}{}_L . Y^{(\alpha)}{}_L, X^{(\alpha)}{}_R . Y^{(\alpha)}{}_L, X^{(\alpha)}{}_L . Y^{(\alpha)}{}_R, X^{(\alpha)}{}_R . Y^{(\alpha)}{}_R) \\ \tilde{Z}_R^{(\alpha)} = \max(X^{(\alpha)}{}_L . Y^{(\alpha)}{}_L, X^{(\alpha)}{}_R . Y^{(\alpha)}{}_L, X^{(\alpha)}{}_L . Y^{(\alpha)}{}_R, X^{(\alpha)}{}_R . Y^{(\alpha)}{}_R) \end{cases}$$

Lorsque l'on utilise le calcul à intervalles, plusieurs apparitions d'une même variable dans une expression reviennent à comptabiliser plusieurs fois l'incertitude sur la variable en question, rendant le résultat d'un calcul bien plus imprécis qu'il ne pourrait l'être. C'est pourquoi nous allons montrer comment obtenir en pratique un résultat optimal d'une fonction. En ne considérant que les bornes minimales et maximales des variables d'entrées, la procédure proposée par Buckley présuppose la monotonie de la fonction d'agrégation par rapport aux variables d'entrée. Pour une même α−coupe et pour calculer les bornes minimale et maximale de l'intervalle associé à une variable de sortie y, sa procédure consiste à combiner de manière successive les intervalles associés aux termes figurant au second membre de l'équation $y=f(x_1, x_2,\ldots, x_n)$.

Soit $y = f(x_1, x_2,\ldots,x_n)$, où chaque x_i varie dans l'intervalle $[x_{iL}^{(\alpha)}, x_{iR}^{(\alpha)}]$.

Si les conditions suivantes sont vérifiées :

- f est localement monotone par rapport à chaque argument (Une fonction dérivable est localement monotone par rapport à x_i si le signe de sa dérivée $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ ne dépend pas de x_i, le signe de la dérivée est alors constant et la restriction est donc monotone),
- $\forall j \in E_1$, f est croissante par rapport à x_i,
- $\forall j \in E_2$, f est décroissante par rapport à x_i.

Alors $[Y_L^{(\alpha)}, Y_R^{(\alpha)}]$

$$y_L^{(\alpha)} = \min_{w \in H} \left\{ f(w) \middle| \begin{array}{l} \forall j \in E_1, w_j = x_{jL}^{(\alpha)} \\ \forall j \in E_2, w_j = x_{jR}^{(\alpha)} \end{array} \right\} \qquad \text{IV.17}$$

$$y_R^{(\alpha)} = \max_{w \in H} \left\{ f(w) \middle| \begin{array}{l} \forall j \in E_1, w_j = x_{jR}^{(\alpha)} \\ \forall j \in E_2, wj = x_{jL}^{(\alpha)} \end{array} \right\} \qquad \text{IV.18}$$

où H est le produit cartésien des intervalles $[x_i^-, x_i^+]$ ($H = \times_i [x_i^-, x_i^+]$) et E_1, E_2 sont deux ensembles disjoints, qui ne forment pas nécessairement une partition de $\{1,..,n\}$. Le choix des bornes sur les intervalles d'entrée est fait suivant le signe de la dérivée partielle de la fonction de sortie y par rapport aux variables d'entrée x_i (suivant le signe $\partial y/\partial x_i$), de manière à obtenir en sortie l'intervalle le plus petit garantissant que les valeurs réelles seront à l'intérieur de cet intervalle.

Exemple IV.2

Dans un arbre de défaillances constitué d'une porte "OU" à 2 entrées A et B, la probabilité de défaillance de l'événement sommet y, de l'arbre est donnée par :

$$P_y(t) = 1 - \prod_{i=1}^{2}(1 - P_i(t)) = 1 - \prod_{i=1}^{2}\exp(-\lambda_i.t) = f(P_A,P_B) = P_y(t) = P_A + P_B - P_A \times P_B$$

$$\left.\begin{array}{l} \dfrac{\partial f(P_A, P_B)}{\partial P_A} = 1 - P_A \geq 0 \\ \dfrac{\partial f(P_A, P_B)}{\partial P_B} = 1 - P_B \geq 0 \end{array}\right\} \Longrightarrow \text{(f est localement monotone)}$$

f est croissante par rapport à P_A et P_B alors l'expression de $P_y^{(\alpha)} = [P_{yL}^{(\alpha)}, P_{yR}^{(\alpha)}]$ est donnée par :

$$P_{y_L}^{(\alpha)} = P_{AL}^{(\alpha)} + P_{BL}^{(\alpha)} - P_{AL}^{(\alpha)} \times P_{BL}^{(\alpha)}$$
$$P_{y_R}^{(\alpha)} = P_{AR}^{(\alpha)} + P_{BR}^{(\alpha)} - P_{AR}^{(\alpha)} \times P_{BR}^{(\alpha)}$$

B/ Impact de l'imprécision des taux de défaillances dans un atelier de production laitière : Application de l'approche de Buckley

La construction de l'arbre des défaillances associé à l'atelier de production laitière, vise à déterminer les enchaînements d'évènements pouvant conduire à l'événement final retenu. Cette analyse se termine lorsque toutes les causes potentielles, correspondant à des évènements élémentaires, sont identifiées.

L'arbre des défaillances relatif à l'atelier étudié apparaît à la figure IV.34, les différents types de défaillances des composants sont cependant clairement représentés.

L'expression logique F_0 de l'événement indésirable (arrêt de la ligne bouteille) à partir de l'arbre de défaillance est :

$F_0 = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5$

$= [(d_a \times d_b)+(d_c+ d_d)]+[(d_e + d_f) + d_g]+[(d_h \times d_i)+(d_j+ d_k)]+[d_l + d_m+ d_n + d_o] +[(d_p + d_q)+(d_r +d_s)]$

$= [ds_0+ds_1] + [ds_2+d_g] + [ds_3+(d_j + d_k)] + [d_l + d_m+ d_n + d_o] + [ds_4 + ds_5]$

avec :

$ds_0 =(d_a \times d_b)$; $ds_1 = (d_c+ d_d)$; $ds_2 =(d_e + d_f)$; $ds_3 =(d_h \times d_i)$; $ds_4 = (d_p + d_q)$; $ds_5 = (d_r +d_s)$;

On définit les vecteurs :

- Des défauts de base (défauts associés aux événements de base) :

$D = [d_a ; d_b ; d_c ; d_d ; d_e ; d_f ; d_g; d_h ; d_i ; d_j ; d_k ;d_l; d_m ; d_n ; d_O ; d_p ; d_q ; d_r ; d_s]$

- Des défauts dérivés (combinaisons des défauts de base) :

$\overline{D} = [ds_0 ; ds_1 ; ds_2 ; ds_3 ; ds_4 ; ds_5]$

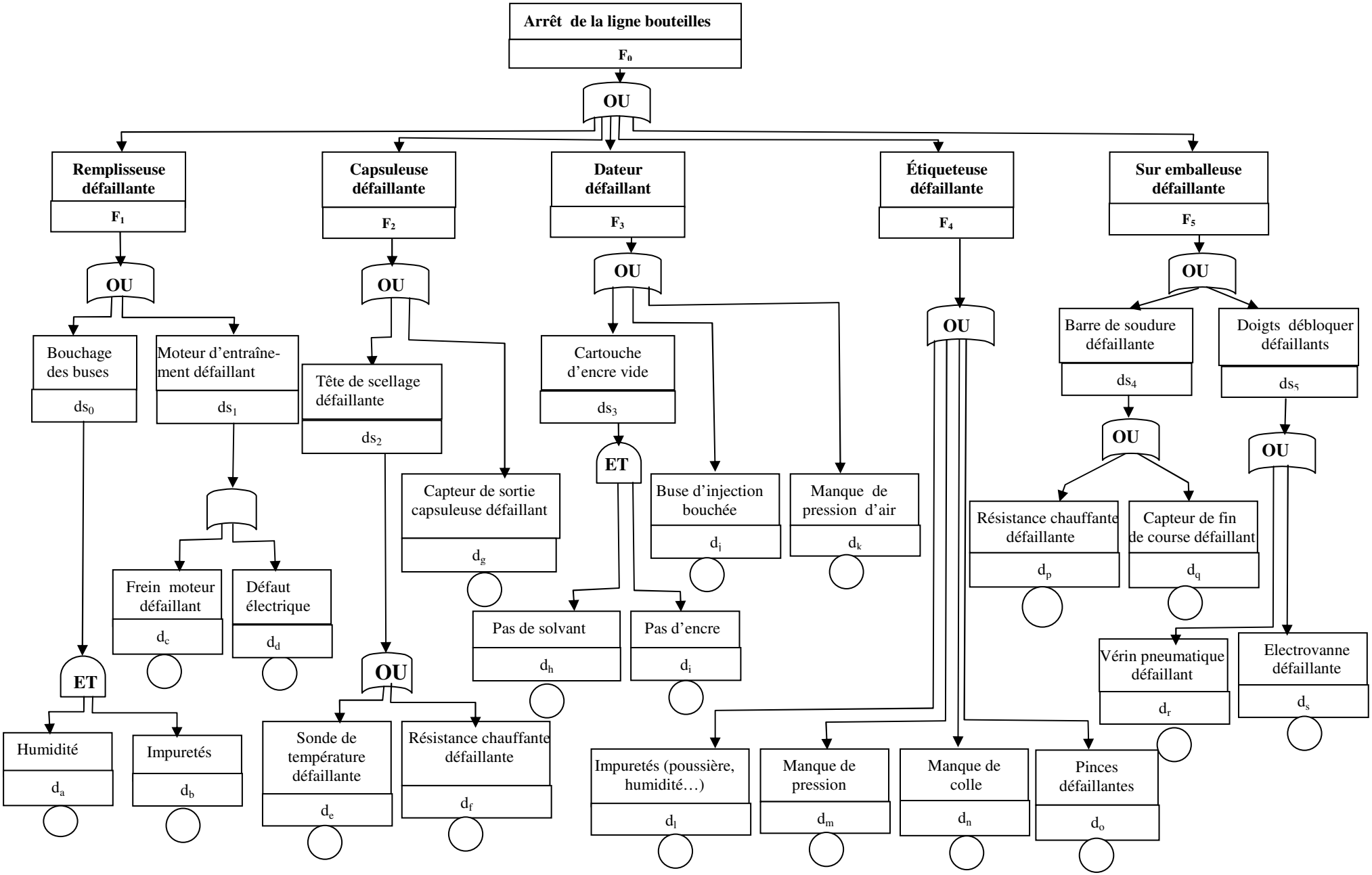


Figure IV.34 : Arbre de défaillances associé à un atelier de production

Afin de tenir compte des imprécisions relatives aux données de fiabilité des composants de l'atelier de production laitière et de quantifier les incertitudes des résultats obtenus, nous proposons une modélisation des imprécisions des taux de défaillance des composants par des nombres flous triangulaires. Les taux de défaillances (probabilité floue P_i) associés aux événements de base sont des nombres flous, du type triangulaire, figure IV.35 et caractérisés par 3 paramètres m_i, a_i et b_i (fournis par les experts) ; m_i la valeur modale représente la valeur la plus probable du taux de défaillance λ_i. a^i est étalement gauche m^i et b^i étalement droite de m^i.

Dans le tableau IV.6, nous donnons les valeurs de ces 3 paramètres pour chaque événement de base de l'ADD. L'avantage d'utiliser une forme triangulaire pour modéliser les taux de défaillance réside dans le fait qu'elle peut être biaisée vers la droite ou vers la gauche par rapport à sa valeur la plus probable. Un autre avantage inhérent aux nombres flous triangulaires est la facilité d'utilisation grâce à la simplification des opérations arithmétiques floues.

Les arbres de défaillances floues sont traités par la méthode de Buckley [BUC, 02]. Les fonctions d'appartenance, représentant les probabilités floues des événements de base, sont découpées en α–coupes (figure IV. 36). Chaque α–coupe d'une probabilité floue d'un événement de base est utilisée pour calculer l'α–coupe correspondant à la probabilité de l'événement sommet F_0 (arrêt de la ligne bouteille), qui représente la probabilité floue de défaillance de l'atelier. En utilisant la méthode des α-coupes et l'approche floue de Buckley définie précédemment, on détermine la distribution de possibilité de la probabilité d'occurrence de l'événement sommet (F_0) à partir des distributions de possibilités des probabilités de défaillances des composants (événements de base) :

$$P(t)_{F_0}{}^{(\alpha)} = P(t)^{(\alpha)} = [P(t)_{F_0,L}{}^{(\alpha)}, P(t)_{F_0,R}{}^{(\alpha)}]$$

avec :

$$P(t)_{F0,L}{}^{(\alpha)} = 1-[(1-P(t)_{F1,L}{}^{(\alpha)}) \times (1-P(t)_{F2,L}{}^{(\alpha)}) \times (1-P(t)_{F3,L}{}^{(\alpha)}) \times (1-P(t)_{F4,L}{}^{(\alpha)}) \times (1-P(t)_{F5,L}{}^{(\alpha)})]$$

et :

$$P(t)_{F0,R}{}^{(\alpha)} = 1-[(1-P(t)_{F1,R}{}^{(\alpha)}) \times (1-P(t)_{F2,R}{}^{(\alpha)}) \times (1-P(t)_{F3,R}{}^{(\alpha)}) \times (1-P(t)_{F4,R}{}^{(\alpha)}) \times (1-P(t)_{F5,R}{}^{(\alpha)})]$$

On constate que les événements les plus critiques dans l'arbre sont k, m, l et s associés respectivement aux défauts d_k, d_m, d_l et d_s (plus grande valeur de probabilité). De plus, le calcul de la probabilité de l'événement sommet de l'arbre nous indique que ces événements contribuent à l'imprécision entachant le taux de défaillance de l'événement indésirable.

Le calcul de la probabilité P_{F0}, nous permet la détermination des composants critiques de l'arbre et ainsi d'améliorer la fiabilité du système. En outre, cette probabilité nous guide dans la localisation des événements de base qui participent le plus à l'imprécision du taux de défaillances de l'évènement sommet et ainsi de réduire efficacement cette imprécision par un retour d'expérience sur l'imprécision sur les évènements élémentaires concernés.

L'implantation de telle supervision est intéressante mais pour qu'elle puisse fonctionner il faut faire appel à l'expertise humaine qui détient des connaissances approfondies dans ce domaine et qui est capable de formuler et de transmettre son savoir faire.

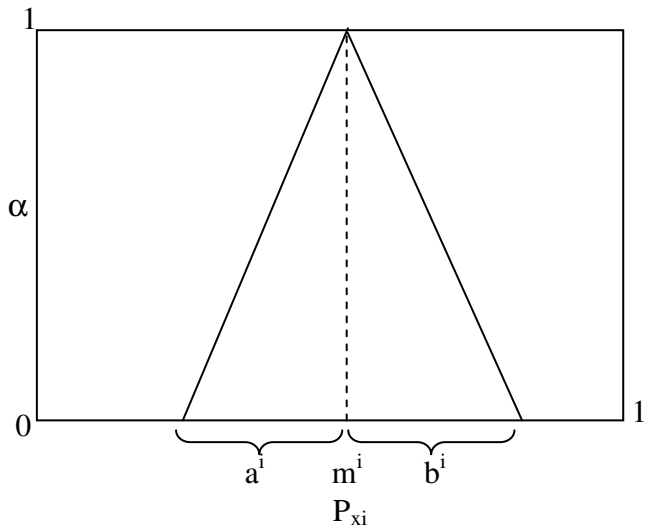


Figure IV.35 : Probabilité de défaillance floue d'un composant i

Tableau IV.6 : Paramètres de distributions de possibilités des P_i

Evénement de base	m($\times 10^{-2}$)	a ($\times 10^{-2}$)	b ($\times 10^{-2}$)
d_a	0,15	0,111	0,23
d_b	0,14	0,121	0,21
d_c	0,413	0,32	0,48
d_d	0,32	0,25	0,33
d_e	0,28	0,222	0,106
d_f	0,34	0,21	0,43
d_g	0,09	0,06	0,072
d_h	0,19	0,09	0,177
d_i	0,18	0,13	0,122
d_j	0,191	0,17	0,221
d_k	0,63	0,45	0,411
d_l	0,505	0,41	0,66
d_m	0,512	0,43	0,51
d_n	0,365	0,28	0,676
d_o	0,35	0,291	0,632
d_p	0,364	0,04	0,44
d_q	0,254	0,07	0,05
d_r	0,307	0,039	0,579
d_s	0,630	0,59	0,079

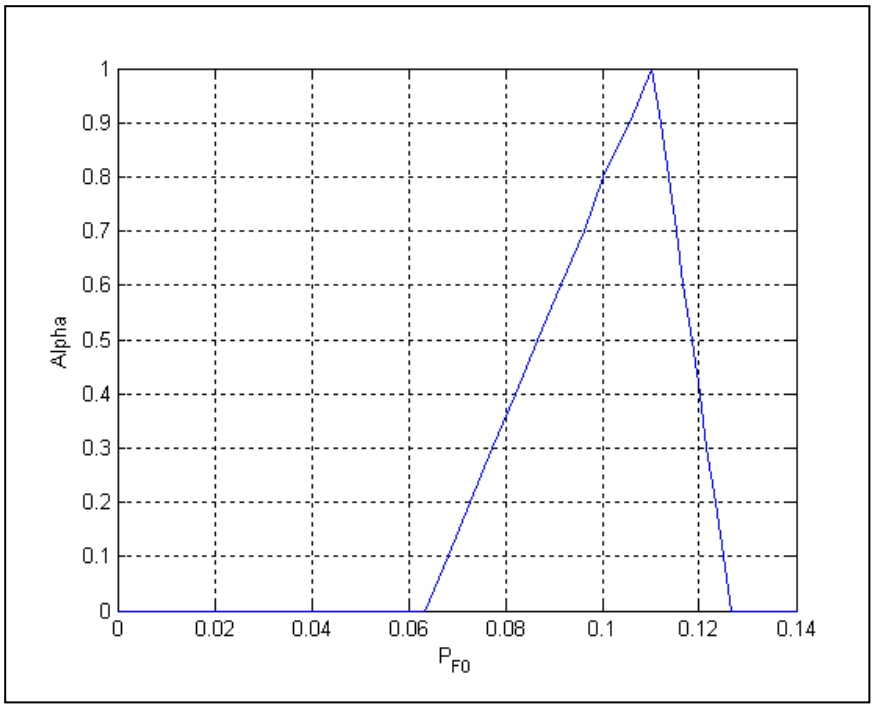


Figure IV.36: Probabilité de défaillance floue de l'événement sommet F_0

IV.4.3.4 Conclusion

Dans cet section, nous avons proposé une approche floue basée sur l'utilisation de distributions de possibilités pour représenter l'incertitude des probabilités de défaillances d'un événement sommet d'un arbre de défaillance associé à un atelier de production laitière.

L'approche floue intègre des informations supplémentaires par rapport à d'autres approches (l'approche probabiliste par exemple est basée uniquement sur les probabilités supérieures et inférieures). En effet, l'approche floue présente l'avantage de donner la distribution de possibilités du taux de défaillance de l'événement sommet.

L'approche floue est basée sur l'intégration de la méthode des α-coupes dans les arbres de défaillance afin de déterminer la probabilité de défaillance floue d'un événement indésirable dans un atelier manufacturier : Grâce à la propriété de monotonie inclusive et l'approche floue de Buckley, les intervalles liés aux niveaux α s'emboitent pour construire le nombre flou caractéristique de l'événement sommet de l'arbre.

L'application de l'approche de Buckley à un atelier manufacturier à contrainte de temps a montré que les résultats obtenus sont très intéressants : Cette approche est une approche globale puisqu'elle permet de surveiller la production ainsi que l'outil de production. Nous avons apporté ainsi une aide à la décision aux fiabilistes, pour réduire d'une manière efficace les incertitudes dans la détermination de la probabilité d'apparition de l'événement sommet.

IV.5 Conclusion

Ce chapitre a commencé par la présentation de la gestion des incertitudes et des perturbations temporelles dans les ateliers à contraintes de temps. Ce problème s'est révélé ardu et dans un cas général nos travaux n'intègre pas l'observabilité et la localisation des perturbations temporelles.

Une contribution importante de ce chapitre est l'intégration des résultats concernant la robustesse dans la génération de symptômes et la classification des comptes-rendus des différentes actions. Cette classification, basée sur la logique floue, est très utile pour la supervision; car elle permet de préserver la fonction de production sur une plage étendue. Nous avons ainsi montré que la robustesse permet de poursuivre la production dans un mode qualifié de dégradé, fournissant des garanties de qualité et de sûreté satisfaisante.

Dans la troisième partie, nous avons présenté un modèle de surveillance d'un système de type manufacturier, basée sur le suivi en temps réel du fonctionnement. L'objectif principal est de détecter et localiser les défaillances qui peuvent affecter les performances du système en termes de productivité et de sûreté. Une procédure de surveillance, comportant trois modules a été développée ; A partir du modèle structurale qui définit les fonctions des différents éléments du procédé et leurs interactions, nous construisons un module de détection capable de détecter toute déviation du comportement du système surveillé de manière locale ou de manière distribuée. Le module de détection communique avec un module de diagnostic permettant localiser et d'identifier l'état défaillant du système en utilisant l'arbre de défaillances flou. Cet outil permet de représenter l'incertitude des probabilités de défaillances d'un événement sommet.

L'application à un atelier de production laitière qui inclut les opérations de transport et les opérations sur machines, permet d'illustrer la pertinence de ces outils.

Conclusion

Conclusion

La gestion des perturbations temporelles et la contribution à une nouvelle approche de surveillance des systèmes manufacturiers à contraintes temporelles, constituent les principales contributions de nos travaux de recherche.

Après avoir présenté dans le premier chapitre les structures, les propriétés et les objectifs des systèmes de production, nous avons positionné la problématique relative à la robustesse de la commande face aux perturbations et la surveillance des systèmes de production. Ce chapitre a permis de présenter le contexte dans lequel nos travaux s'inscrivent.

Une revue succincte des principaux modèles de réseaux de Petri utilisés dans la littérature pour modéliser les systèmes de production à contraintes du temps, est présentée. Cette présentation met en évidence l'efficacité de ces outils en termes de modélisation. Deux applications, utilisant le formalisme des RdP P-temporels ont été présentées. Une application d'une méthode de transformation des GEV basée sur un algorithme proposé dans Nakamura et Silva, à un atelier de production laitière est réalisée. Cette transformation permet d'obtenir un GE 1-valué pour lesquels il existe une littérature scientifique importante.

L'étude de la robustesse des ateliers manufacturiers à contraintes de temps, constitue par ailleurs partie substantielle de ce mémoire. Dans ce contexte, les travaux présentés s'attachent à construire une approche de commande robuste. La contribution de ce mémoire est la caractérisation analytique de la capacité à rejeter des perturbations temporelles en utilisant une couche de commande exploitant les degrés de liberté du système.

Nous présentons alors trois approches de commande robuste face aux perturbations temporelles. La première consiste à générer par la commande un décalage temporel de même nature que la perturbation afin d'éviter la mort de marques aux niveaux des transitions de synchronisation du modèle RdP P-temporel. La deuxième, constitue notre contribution, se propose de rejeter la perturbation dès son observation en jouant sur la commande. Une troisième approche (combinaison des deux précédentes) a été détaillée. Une étude comparative de l'efficacité de ces trois stratégies est développée. Une validation sur un atelier de production laitière est effectuée.

Concernant la robustesse passive, un algorithme de calcul agrégeant les robustesses locales a procuré une borne supérieure. Cet algorithme tient en considération la transmission d'une perturbation sur deux chemins parallèles dans le modèle, ce que ne faisait pas la proposition de Jerbi Nabil.

Concernant la surveillance, une autre contribution de nos travaux de recherche, consiste à concevoir un système de surveillance; capable de détecter, localiser et diagnostiquer toute défaillance, susceptible d'affecter la production et ceci le plus tôt possible. La fonction de surveillance que nous développons, s'inscrit dans un processus global de supervision d'un système en cours de fonctionnement. Elle vise à partir des informations disponibles sur ses modes de fonctionnement, à détecter, à localiser et à diagnostiquer les défaillances qui peuvent affecter ses performances et sa sûreté de fonctionnement.

Partant d'un système de production qui est supposé ordonnancé, nous nous sommes intéressés à la surveillance, en utilisant la technologie des chroniques, des différentes activités du système. La démarche développée, revient à vérifier que toutes les activités sont exécutées dans des délais préalablement définis. Ainsi, pour chaque tâche nous surveillons la durée entre l'instant de début et l'instant où le capteur a indiqué la fin d'exécution. Au niveau du réseau de Petri P-temporels, cela se traduit par la surveillance du temps de séjour q_i d'une marque dans une place p_i. De ce fait, nous pouvons dire que lorsque le temps écoulé entre ces deux événements n'est pas respecté, qu'il y a risque de défaillance.

Il s'ensuit une opération de diagnostic qui consiste à déterminer les causes du problème observé. Une approche floue, basée sur l'utilisation de distributions de possibilités pour représenter l'incertitude des probabilités de défaillances d'un événement sommet d'un arbre de défaillance associé à un atelier de production laitière, est développée.

Pour ce qui est de la gestion des alarmes, nous avons proposé un filtrage flou, intégrant le savoir faire d'un expert de l'atelier et la connaissance des plages de robustesse dans l'interprétation des comptes rendus en provenance de l'atelier. Ce filtrage permet de préserver la fonction de production sur une plage étendue et de poursuivre la production dans un mode qualifié de dégradé, fournissant des garanties de qualité et de sûreté satisfaisante.

Il importera par ailleurs d'étendre l'aspect applicatif des stratégies de robustesse détaillées dans ce rapport. Une étude de la robustesse des réseaux de transport en tant que SED permettrait d'avoir une évaluation concrète des apports de nos approches de robustesse. Une caractéristique importante dans l'évaluation des réseaux de transport est la stabilité. Elle correspond à la capacité d'un réseau à reprendre son fonctionnement normal après l'apparition d'un retard.

Pour le filtrage des comptes rendus, il serait intéressant d'envisager la possibilité de pouvoir utiliser d'autres fonctions d'appartenance que celles actuellement disponibles. De manière générale, la prise de décision devrait être affinée. Les axes d'amélioration sont l'analyse des comportements du système d'une part et leur modélisation mathématique d'autre part.

Il serait intéressant de développer une réflexion spécifique concernant la maintenance des ateliers à contraintes de temps. L'application traitée dans ce rapport a ainsi laissé entrevoir que certaines approches classiques n'étaient pas si appropriées. Dans le même ordre d'idée, les informations incertaines que nous manipulons dans ce rapport pourraient donner lieu à une intégration plus fine dans le pilotage de l'atelier. On se demanderait par exemple s'il est judicieux de dégrader le taux de production pour améliorer les capacités de maintenance de l'atelier.

Bibliographie

Bibliographie

[AFN, 02] Norme AFNOR X 60-000, "Maintenance industrielle – Fonction maintenance", Edition Afnor, Paris, 2002.

[ALA, 05] M.K.D. Alaoui, "Etude et supervision des graphes d'événements temporisés et temporels : vivacité, estimation et commande", Thèse de Doctorat, Université d'Angers, 2005.

[AMA, 08] S. Amari et C. Martinez, "Commande d'un système de production à temps critique", Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA'08), Bucharest, Juin 2008.

[AND, 96] D. Andreu, "Commande et supervision des procédés discontinus : une approche hybride". Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse III, 1996.

[ART, 02] C. Artigues, C. Briand, M.C. Portmann et F. Roubellat, "Méthodes de pilotage des systèmes de production", Chapitre de "Pilotage d'atelier basé sur un ordonnancement flexible", Traité IC2 – Série Information-Commande-Communication, Ed. Hermès, Paris, 2002.

[BAI, 94] P. Baillet, "Contribution à l'amélioration de la réactivité dans les systèmes de production notamment par la mise en œuvre des concepts de décentralisation des fonctions de décision", Thèse de Doctorat, Université de Droit, d'Economie et des Sciences d'Aix Marseille III, Novembre 1994.

[BEN, 08] V. Benard, L. Cauffriez et D. Renaux, "The Safe-SADT method for aiding designers to choose and improve dependable architectures for complex automated systems", Journal of Reliability Engineering and System Safety, Vol. 93, pp. 179–196, 2008.

[BER, 00] P. Berruet, A. Toguyeni et E. Craye, "Modèles et algorithmes pour la surveillance/supervision", Chapitre 6 de "Maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement des systèmes de production", Edité par E. Niel et E. Craye, Traité IC2 – Série Systèmes Automatisés, Ed. Hermès, Paris, 2000.

[BER, 05] B. Berthomieu, D. Lime et O. H. Roux, "Problèmes d'accessibilité et espaces d'états abstraits des réseaux de Petri temporels à chronomètres", Journal européen des systèmes automatisés, Vol. 39, pp. 223–238, 2005.

[BOI, 93] J.-L. Boimond, "Internal Model Control of Discrete-Event Processes in the Max-Algebra", European Control Conference (ECC'93), Groningen, pp. 150–157, June 1993.

[BON, 93] De Bonneval, "Mécanismes de Reprise dans les Systèmes de Commande à Événements Discrets", Thèse de Doctorat de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, Septembre 1993.

[BON, 05] P. Bonhomme, "Control of time critical systems using partial order", IMAC'05, Paris, July 2005.

[BOU, 04] A. Boufaied, A. Subias et M. Combacau, "Distributed Fault Detection with delays consideration", 15th International Workshop on Principles of Diagnosis, Carcassonne, June 2004.

[BOU, 05] A. Boufaied, A.Subias, et M. Combacau, "Distributed time constraints verification modelled with time Petri nets", 17th IMACS World Congress on Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation, Paris, July 2005.

[BOU, 06] A. Boufaied, A. Subias et M. Combacau, "Détection distribuée par reconnaissance floue de chroniques", Journal Européen des Systèmes Automatisés (JESA), Vol. 40, n°2, pp. 233–259, 2006.

[BRI, 98] N. Brinzei, "L'état de l'art sur la conduite de systèmes flexibles de production", Rapport à l'Université Polytechnique de Timisoara, 1998.

[BUC, 02] J.J. Buckley, "Fuzzy Probabilities: New Approach and Applications", Physica-Verlag, Heidelberg, 2002.

[CAM, 91] J. Campos, G. Chiola et M. Silva, "Ergodicity and throughput bounds of Petri nets with unique consistent firing count vector", IEEE Trans. on Software Engineering, Vol. 17, pp. 117–125, 1991.

[CAU, 07] P. Caulier et O. Delepine, "SACRE : un Système d'Aide à la Capitalisation et à la Réutilisation d'Expériences de supervision. Raisonnement à Partir de Cas 2: Surveillance, Diagnostic et Maintenance", Traité IC2 – Série Informatique et Systèmes d'Information, Ed. Hermès, Paris, 2007.

[CHA, 95] A. Chaillet-Subias, "Approche multi-modèles pour la commande et la surveillance en temps réel des systèmes à événements discrets", Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, Décembre 1995.

[CHE, 06] A. Chelbi, M. R. Bennour et N. Zerhouni, "Contribution à la modalisation des approches de coopération en e-maintenance", 6éme Conférence Francophone de Modélisation et SIMulation (MOSIM'06), Rabat, 2006.

[COL, 97] S. Collart-Dutilleul, "Commande robuste d'ateliers à contraintes de temps de séjour : application à la galvanoplastie", Thèse de Doctorat, Université de Savoie, Annecy, Décembre 1997.

[COL, 03] S. Collart-Dutilleul, H. Dhouibi et E. Craye, "Internal Robustness of Discrete Event System with Internal Constraints in Repetitive Functioning Mode", Advanced Computer Systems Conference (ACS'03), pp. 353–361

Miedzyzdroje, 2003.

[COL, 07] S. Collart Dutilleul, N. Jerbi, E. Craye et M. Benrejeb, "Robust Dynamic Control of Multi-product Job-shops", 4th IFAC Conference on Management and Control of Production and Logistics (MCPL'07), Sibiu, Vol. 2, pp. 265–270, September, 2007.

[COL, 08] S. Collart-Dutilleul, "Les Réseaux de Petri P-temporels : Modélisation et Validation d'Exigences Temporelles", Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Technologies de Lille, Ecole Centrale de Lille, Novembre 2008.

[COM, 00] M. Combacau, P. Berruet, P. Charbonnaud, A. Khatab et E. Zamai, "Supervision and monitoring of production systems", Conference on Management and Control of Production and Logistics (MCPL'00), Grenoble, July 2000.

[COO, 94] F. Coolen et M.J Newby, "Bayesian reliability analysis with imprecise prior probability". Reliability Engineering and System Safety, Vol. 43, pp. 75–85, 1994.

[COR, 00] M.O. Cordier et C. Dousson, "Alarm driven monitoring based on chronicles". 4th Symposium on Fault Detection Supervisory and Safety for Technical Process (SAFEPROCESS'2000), Budapest, pp. 286–291, June 2000.

[COR, 07] M.O. Cordier, X. Le Guillou, S. Robin, L. Rozé, et T. Vidal, "Distributed Chronicles for On-line Diagnosis of Web Services", 18th International Worshop On Principles of Diagnosis (DX'07), Nashville, pp. 37–44, May 2007.

[COR, 96] ARTEMIS-IMAG, ERIHST, LAG et LAMLII-CESALP <<CORINE>> : "COduite Robuste et INtelligente dans les Entreprises manufacturières", Rapport Technique, Mai 1996.

[COW, 02] P. I. Cowling et M. Johansson, "Using real time information for effective dynamic scheduling", European Journal of Operational Research, Vol. 139, pp. 230–244, 2002.

[DAV, 92] R. David et H. Alla , "Du Grafcet aux réseaux de Petri", Ed. Hermès, Paris, 1992.

[DEB, 07] S. Debernard, B. Guiost, T. Poulain, D. Annebicque et P. Millot, "Integrating Human Factors in the Design of Intelligent Systems: an example in Air Traffic Control", International Journal of Intelligent Systems Technologies and Applications, 2007.

[DEC, 10] P. Declerck et D. Alaoui, "Optimal control synthesis of timed event graphs with interval model specifications", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 55, n°2, pp. 518−523, 2010.

[DEN, 05] J. P. Denat, S. Collart Dutilleul et F. Chetouane, "Cycle time calculation for electroplating lines steady state operation using p-time strongly connected event graphs", *IMACS'05*, Paris, July 2005.

[DHO, 05] H. Dhouibi, "Utilisation des réseaux de Petri à intervalles pour la régulation d'une qualité : Application à une manufacture de tabac", Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Ecole Centrale de Lille, Décembre 2005.

[DIA, 01] M. Diaz, "Les réseaux de Petri – Modèles fondamentaux", Série Informatique et Systèmes d'Information, Ed. Hermès, Paris, 2001.

[DOJ, 98] M. Dojat, N. Ramaux et D. Fontaine, "Scenario recognition for temporal reasoning in medical domains", Artificial Intelligence in Medicine, Vol. 14, pp. 139–155, October 1998.

[DOU, 93] C. Dousson, P. Gaborit et M. Ghallab, "Situation Recognition: Representation and Algorithms", International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI'93), Chambéry, pp. 166–172, 1993.

[DOU, 94] C. Dousson et M. Ghallab, "Suivi et reconnaissance de chroniques", Revue d'Intelligence Artificielle, Vol. 8, n°1, pp. 29–61, 1994.

[DOU, 07] C. Dousson et P. Le Maigat, "Chronicle Recognition Improvement Using Temporal Focusing and Hierarchization", Proceedings of the 20th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI 07), Hyderabad, January 2007.

[DUP, 99] M. Dupas, Y. Sallez, T. Berger et R. Soenen, "Reconfiguration des systèmes automatisés de production", 3ème Congrès International de Génie Industriel (CIGI' 99), Montréal, Mai 1999.

[DUP, 05] M. Dupuy, "Contributions à l'analyse des systèmes industriels et aux problèmes d'ordonnancement à machines parallèles flexibles : application aux laboratoires de contrôle qualité en industrie pharmaceutique", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Septembre 2005.

[EUN, 06] J.L.Eun, "Reconfiguration dynamique de la commande d'un système manufacturier : approche par la synthèse de la commande", Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, Décembre 2006.

[EZZ, 08] H. Ezzedine, T. Bonte, C.Kolski et C. Tahon, "Intermodal transportation system: integration of traffic control system and users information system", International Journal of Computer Communication and Control, Vol. 3, n°3, September, 2008.

[FEN, 06] J. Feng, et M.D. Wu, "The profust fault tree and its analysis", Journal of National University of Defense Technology, Vol. 23, pp. 85–88, 2006.

[GOT, 93] Gotha, "Les problèmes d'ordonnancement", RAIRO Recherche Opérationnelle/Operations Research, Vol. 27, n°1, pp. 77–150, 1993.

[GRE, 08] A. Gregoriades et A. Sutcliffe, "Workload prediction for improved design and reliability of complex systems", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 93, Issue 4, pp. 530–549, 2008.

[GOU, 04] D. Gouyon, "Contrôle par le produit des systèmes d'exécution de la production : apport des techniques de synthèse ", Thèse de Doctorat, Nancy-I, 2004.

[GUI, 04] B. Guiost , S. Debernard, T. Poulain et P. Millot, "Evaluation of a new ATC support system based on human machine task delegation", 9th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium, Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems, Atlanta, September 2004.

[GUI, 08] X. Le Guillou, M.O. Cordier, S. Robin et L. Rozé, "Chronicles for On-Line Diagnosis of Distributed Systems", 18th European Conference on Artificial Intelligence (ECAI'08), Patras, July 2008.

[HAL, 07] A.R Hale., B.J.M. Ale, L.H.J. Goossens, T. Heijer, et L.J Bellamy, "Modeling accidents for prioritizing prevention", Reliability Engineering & System Safety, Vol. 92, Issue 12, pp. 1701–1715, 2007.

[HAM, 06] S. Hamaci, J.L. Boimond et S. Lahaye, "Performance Analysis of Timed Event Graphs with Multipliers using (Min, +) Algebra", Journal of Discret Event System, Vol. 16, pp. 185–190, 2006.

[HIL, 89] H. P. Hillion, "Modélisation et analyse des systèmes de production discrets par les réseaux de Petri temporisés", Thèse de Doctorat, Université Paris VI, Janvier 1989.

[HOL, 90] L.E. Holloway et B.H. Krogh, "Fault detection and diagnosis in manufacturing systems: a behavioral model approach", IEEE International Conference on Computer Integrated Manufacturing, Lisbon, May 1990.

[HOL, 91] L.E. Holloway et B.H. Krogh, "Monitoring behavioural evolution for online fault detection", IFAC / IMACS International Conference on Fault Detection, Supervision & Safety for Technical Process, SAFEPROCESS'91, Germany, September 1991.

[HUA, 04] X.T. Huang, et J. Z. Ming, "Posbist fault tree analysis of coherent systems", Reliability Engineering and System Safety, Vol. 84, pp.141–148, 2004.

[HUB, 81] P.J. Huber, "Robust Statistics", Jhon Wiley et Sons, New York, 1981.

[JEO, 06] T. Jeron, H. Marchand, S. Pinchinat, et M.O. Cordier, "Supervision patterns in discrete event systems diagnosis", 8th International Workshop on Discrete Event Systems (WODES'06), Michigan, 2006.

[JER, 04] N. Jerbi, S. Collart Dutilleul, E. Craye et M. Benrejeb, "Robust Control of Multi-product Job-shops in Repetitive Functioning Mode", IEEE Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC'04), The Hague, Vol. 5, pp. 4917–4922, October 2004.

[JER, 05] N. Jerbi, S. Collart Dutilleul, E. Craye et M. Benrejeb, "Observability of Tolerant Multi-product Job-shops in Repetitive Functioning Mode", 17th IMACS Word Congress on Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation, Paris, CD ROM, July 2005.

[JER, 06a] N. Jerbi, S. Collart Dutilleul, E. Craye et M. Benrejeb, "Robustesse d'un atelier à tâches sans assemblage en fonctionnement répétitif", Séminaire d'Automatique – Industrie (SAI'06), Gabès – Matmata, CD ROM, Février 2006.

[JER, 06b] N. Jerbi, S. Collart Dutilleul, E. Craye et M. Benrejeb, "Commandabilité de systèmes manufacturiers à contraintes de temps" (JTEA'06), Hammamet, CD ROM, May 2006.

[JER, 06c] N. Jerbi, S. Collart Dutilleul, E. Craye et M. Benrejeb, "Intégration de la robustesse dans la supervision de systèmes manufacturiers à contraintes de temps", Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA'06), Bordeaux, CD ROM, Mai 2006.

[JER, 06e] N. Jerbi, S. Collart Dutilleul, E. Craye et M. Benrejeb, "Time Disturbances and Filtering of Sensors Signals in Tolerant Multi-product Job-shops with Time Constraints", International Journal of Computers, Communications & Control, Vol. I, n°4, pp. 61–72, 2006.

[JER, 06f] N. Jerbi, "Apports et Intégration de la Robustesse pour la Supervision de Systèmes Manufacturiers", Thèse de Doctorat, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Décembre 2006.

[JER, 08] N. Jerbi, A. Mhalla, S. Collart Dutilleul, E. Craye et M. Benrejeb, "Rejet de perturbation et commandabilité des systèmes manufacturiers à contraintes de temps". Conférence Internationale Francophone d'Automatique (CIFA'08), Bucharest, Juin 2008.

[JER, 09a] N. Jerbi, A. Mhalla, S. Collart Dutilleul, E. Craye et M. Benrejeb, "Stratégies de Commande de Systèmes Manufacturiers à Contraintes de Temps Face aux Perturbations Temporelles". Revue Electronique Sciences & Technologies de l'Automatique (e-STA), Vol. 6, n° 1, pp. 1–6, 2009.

[JER, 09b] N. Jerbi, S. Collart Dutilleul, E. Craye et M. Benrejeb, "Commande robuste des ateliers manufacturiers à contraintes de temps", Journal Européen des Systèmes Automatisés, Vol. 43, n° 1–2, pp. 7–33,2009.

[KAM, 04] O. Kamach, "Approche Multi-modèle pour les systèmes à événements discrets : Application à la gestion des modes de fonctionnement", Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Décembre

2004.

[KHA, 96] W. Khansa, P. Aygalinc, and J. P. Denat, "Structural analysis of P-Time Petri Nets", Computational Engineering in Systems Applications (CESA'96), Lille, pp. 127–136, Juillet 1996.

[KHA, 97] W. Khansa, "Réseaux de Petri P-temporels: Contribution à l'étude des systèmes à événements discrets", Thèse de Doctorat, Université de Savoie, Annecy, Mars 1997.

[KHA, 00] A. Khatab, "Contrôle et Contrôle Stabilisant des Systèmes à Evénements Discrets Temporels : Application au recouvrement des défaillances des systèmes de production", Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Décembre 2000.

[KLE, 05] S. Klein, "Identification of Discrete Event Systems for Fault Detection Purposes", Thèse de Doctorat, Université de Kaiserslautern, Ecole Normale Supérieure de Cachan, June 2005.

[KOR, 03] O. Korbaa, "Contribution à la Conception et l'Optimisation des systèmes de Transport et de Production", Habilitation à Diriger des Recherches, Université des Sciences et Technologies de Lille, Ecole Centrale de Lille, Décembre 2003.

[LEE, 01] J. Lee, O. Korbaa et J.-C. Gentiona, "Modeling and analysis of cyclic schedule using Petri nets unfolding", IEEE SMC, Tucson, pp. 2211-2216, 2001.

[LEE, 04] J. Lee et O. Korbaa, "Modeling and analysis of ratio-driven FMS using unfolding time Petri nets", Computers & Industrial Engineering(CIE),Vol.46, pp. 639-653, 2004 .

[KEM, 04] T. Kempowsky, "Surveillance des procèdes à base de méthodes de classification : conception d'un outil d'aide pour la détection et le diagnostic des défaillances", Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Décembre 2004.

[LOP, 01] P. Lopez et F. Roubellat, "Ordonnancement de la production", Traité IC2, Série Systèmes Automatisés, Ed. Hermès, Paris, 2001.

[LOT, 07] F. Lotte, A. Lecuyer, F. Lamarche et B. Arnaldi, "Studying the Use of Fuzzy Inference Systems for Motor Imagery Classification", IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, Vol. 15, n°2, June 2007.

[LON, 93a] J. Long et B. Descotes-Genon, "Flow Optimization Method for Control Synthesis of Flexible Manufacturing Systems Modeled by Controlled Timed Petri Nets", IEEE International Conference on Robotics and Automation, Atlanta, Vol. 1, pp. 598–603, May 1993.

[LON, 93b] J. Long, "Sur la conduite hiérarchisée des systèmes flexibles de production",

Thèse de Doctorat, INPG Grenoble, Juin 1993.

[LOS, 07] P. Loslever, J-C. Popieul et P. Simon, "Using Correspondence Analysis when the system description yields several transition matrices. Examples with simulated data and real driver car environment system data". Cybernetics and Systems, pp. 23–45, 2007.

[MAR, 08] P. Marangé, F. Gellot et B. Riera, "Human-Machine Systems concepts applied to Control Engineering Education", IFAC World Congress, Séoul, July 2008.

[MAR, 09] O. Marchetti et A. Munier, "A sufficient condition for the liveness of weighted event graphs", European Journal of Operational Research, Vol. 197, Issue 2, pp. 532–540, 2009.

[MEH, 99] S.V. Mehta et R. Uzsoy, "Predicle scheduling of a single machine subjects to breakdowns", International Journal of Computer Integrated Manufacturing, Vol. 12, pp. 15–28, 1999.

[MER, 74] P. Merlin, "A Stixly of the Recoverability of Communication Protocols". Thèse de Docorat, Université de California, Irvine, 1974.

[MHA, 07] A. Mhalla, K. Ben Othmen et M. Benrejeb, "Surveillance par réseaux de Petri flous : application à un bruleur à fuel". 8th International Conference of Sciences and Techniques of Automatic and Computer Engineering (STA'07), Sousse, Novembre 2007.

[MHA, 08] A. Mhalla, N. Jerbi, S. Collart Dutilleul, E. Craye et M. Benrejeb, "Robustness Computing of Multi product job shops with time constraint". 9th International Conference of Sciences and Techniques of Automatic and Computer Engineering (STA'08), Sousse, November 2008.

[MHA, 09] A. Mhalla, N. Jerbi, S. Collart Dutilleul, E. Craye et M. Benrejeb,"Chronicles for Monitoring a Milk Manufacturing Unit". 3th International Conference on Electrical Engineering Design and Technologies (ICEED), Sousse, November 2009.

[MHA, 10a] A. Mhalla, S. Collart Dutilleul, N. Jerbi , E. Craye et M. Benrejeb, "Robust control strategy in milk manufacturing unit with time constraints". IFAC Symposium on Large Scale Systems: Theory and Applications (LSS'10) Lille, 2010.

[MHA, 10b] A. Mhalla, N. Jerbi , S. Collart Dutilleul, E. Craye et M. Benrejeb, "Fuzzy Filtering of Sensors Signals in Manufacturing Systems with Time Constraints". International Journal of Computers, Communications & Control (IJCCC), Vol. 5, Issue 3, 2010.

[MHA, 10c] A. Mhalla, N. Jerbi, S. Collart Dutilleul, E. Craye et M. Benrejeb, "Distributed Monitoring based on chronicles recognition for Milk Manufacturing Unit". Journal of Automation & Systems Engineering

(JASE), Vol. 4, Issue 1, 2010.

[MHA, 10d] A. Mhalla, S. Collart Dutilleul, N. Jerbi et E. Craye, "Graphe d'événement P-Temporels à arcs valués : Application à une unité de production du lait". Revue Electronique Sciences & Technologies de l'Automatique (e-STA), Vol. 7, n° 1, pp 9–16, 2010.

[MUR, 89] T. Muratat, "Petri Nets : properties, analysis and application", Proceedings of the IEEE, Vol. 77, n° 4, pp. 541–580, 1989.

[NAK, 99] M. Nakamura et M. Silva, "Cycle Time Computation in Deterministically Timed Weighted Marked Graphs", 7th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Vol. 2, pp. 1037– 1046, Spain, 1999.

[NIE, 02] E. Niel, L. Piétrac, A. Khatab et S. Chafik "Surveillance-supervision dans le contexte de la synthèse de lois de commande sûre", Chapitre 12 de «Maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement des systèmes de production», E. Niel et E. Craye, Traité IC2, Série Productique, Ed. Hermès-Lavoisier, Paris, 2002.

[NOU, 97] M. Nourelfath, "Extension de la théorie de la supervision à la commande des systèmes à événements discrets : application à la sécurité opérationnelle des systèmes de production", Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Juillet 1997.

[OUE, 05] I. Ouerghi, L. Hardouin, J.-Y. Morel et M. Bourcerie, "Optimal Control Law for P-Temporal Event Graphs", 17th IMACS Word Congress on Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation, Paris, CD ROM, July 2005.

[PAR, 92] T. Parayre, "Vers une méthode d'exploitation des systèmes automatisés de production", Thèse de Doctorat, Université de Valencienne et du Hainaut Cambrésis, Mars 1992.

[PEN, 05] Y. Pencolé et M.O. Cordier, "A formal framework for the decentralised diagnosis of large scale discrete event systems and its application to telecommunication networks", Artificial Intelligence Journal, Vol. 164, Issues 1–2, pp. 121–170, May 2005.

[PER, 06] J. Perrin, F. Binet, J.J. Dumery, C. Merlaud et J.P. Trichard, "Automatique et informatique industrielle-Bases théoriques, méthodologiques et Techniques", Édition Nathan, France, 2006.

[PER, 06] F. Pérès et D.Noyes, "Envisioning e-logistics developments: making spare parts in situ and on demand-State of art and guidelines for future developments", Computers in Industry, Vol. 57, pp. 490–503, 2006.

[RAC, 06] D. Racoceanu, "Contribution à la surveillance des Systèmes de Production en utilisant les Techniques de l'Intelligence Artificielle", Habilitation à Diriger

les Recherches, Université de Franche-Comté, 2006.

[RAY, 03] H. Rayhane, Z. Simeu-Abazi et T. Bennani, "Surveillance des systèmes de production par automates temporisés", Conférence Internationale sur la productique (CIP' 03), Alger, 2003.

[RAY, 04] H. Rayhane, "Surveillance des systèmes de production automatisés:Détection et Diagnostic", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Juillet 2004.

[RIB, 09] P. Ribot, "Vers l'intégration diagnostic/pronostic pour la maintenance des systèmes complexes", Thèse de Doctorat, Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS).Décembre 2009.

[RAM, 74] C. Ramchandani, "Analysis of asynchronous concurrent systems by timed Petri nets", Technical Report, n° 120, Laboratory for Computer science, MIT, Cambridge, 1974.

[ROY, 97] B. Roy, "Un chaînon manquant en Recherche Opérationnelle et Aide à la Décision : les conclusions robustes". Cahier du Laboratoire d'Analyse et de Modélisation de Systèmes pour l'Aide à la Décision, n° 144, Université de Paris Dauphine, 1997.

[SAH, 87] A.E. K. Sahraoui, "Contribution à la surveillance et à la commande d'ateliers", Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1987.

[SAH, 92] A. E. K. Sahraoui, "An approach for monitoring discrete event systems", AFCET APII, Vol. 26, n° 2, pp. 91–106, 1992.

[SAL, 06] M. Sallak J.F. Aubry et C. Simon, "Aide à la décision dans la réduction de l'incertitude des SIL : une approche floue/possibiliste", Revue électronique, Sciences et Technologies de l'Automatique, 2006.

[SAL, 07a] M. Sallak, C. Simon et J.F. Aubry, "A fuzzy probabilistic approach for determining Safety Integrity Level". IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol.16, pp. 239 - 248, 2007.

[SAL, 07b] M. Sallak, "Evaluation de paramètres de sûreté de fonctionnement en présence d'incertitudes et aide à la conception : Application aux Systèmes Instrumentés de Sécurité", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, Octobre 2007.

[SAW, 06] N. Sawaya et B. Ghaddar, "A Fuzzy Logic Approach for Adjusting the Contention Window Size in IEEE 802.11e Wireless Ad hoc Networks", IEEE International Symposium on Communication, Control, and Signal Processing (IEEE ISCCSP), Marrakech, 2006.

[SFA, 89] A. Sfalcin, M. Roesch, P. Lhoste et G. Morel, "Fiabilité, Disponibilité, et Sécurité des installations intégrant des filtres de comportement", 2éme Colloque Annuel du Club FIABEX, INT, Evry, Novembre, 1989.

[SHA, 08] Z. Shafiq, F. Muddassar et S. Khayam, "A Comparative Study of Fuzzy Inference Systems", Neural Networks and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems for Portscan Detection (EvoWorkshop), pp. 52–61, 2008.

[SIF, 77] J. Sifakis, "Etude du Comportement Permanent des Réseaux de Petri Temporisés", Journées AFCET sur les Réseaux de Petri, Paris, 1977.

[SIL, 96] M. Silva, "Petri net for the design and operation of Manufacturing Systems", 17th International Conference on application and theory of Petri Nets-Manufacturing and Petri Nets, Osaka, pp. 31–61, 1996.

[SIL, 03a] M. Da Silveira, "Sur la distribution avec redondance partielle de modèles à événements discrets pour la supervision de procédés industriels", Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Octobre 2003.

[SIL, 03b] M. Da Silveira, M. Combacau et A. Boufaied, "Prognosis and recovery evaluation in flexible manufacturing systems supervision", Journal of Decision Systems, Vol. 12, n°1, pp. 93–109, 2003.

[SIN, 90] D. Singer, "A fuzzy set approach to fault tree and reliability analysis", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 34, pp. 145–155, 1990.

[SIT, 05] F.B. Sitayeb, "Contribution à l'étude de la performance et de la robustesse des ordonnancements conjoint production/ maintenance : cas du Flowshop", Thèse de Doctorat, Université de Franche Comté, 2005.

[SOM, 93] K.P. Soman et K.B. Misra, "Fuzzy fault tree analysis using resolution identity", International Journal of Fuzzy Mathematics, pp. 193–198, 1993.

[SUB, 06] A. Subias, "Contribution au diagnostic des systèmes complexes", Habilitation à Diriger des Recherches, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Septembre 2006.

[TAI, 07] J. Taisne, "Intelligent alarm process for DMS based on "chronicle" concept", 19th International Conference on Electricity Distribution (CIRE D'07), Vienna, May 2007.

[TAN, 83] H. Tanaka, F. Lai, C. Fan et K. Toguchi, "Fault tree analysis by fuzzy probability", IEEE Trans. Reliability, Vol. 32, pp. 453–457, 1983.

[TEN, 97] C. Teng Lin, "An Adaptive Neural Fuzzy Filter and Its Applications", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. 27, n°4, pp. 635–656, August 1997.

[THE, 05] A. Théron, "Sciences de l'ingénieur automatique : logique, collection taupe - niveau", Édition Ellipses, Paris, 2005

[TER, 97] E. Teruel, J.M. Colom et M. Silva, "Choice-free Petri nets : a model for deterministic concurrent systems with bulk services and arrivals", IEEE Transaction on Systems Man and Cybernetics, pp. 73–83, 1997.

[TOG, 92] A. Toguyeni, "Surveillance et diagnostic en ligne dans les ateliers flexibles de l'industrie manufacturière", Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Novembre 1992.

[TOG, 96] A. Toguyeni, S. El Khattabi et E. Craye, "Functional and/or structural approach for the supervision of flexible manufacturing systems", Computational Engineering in Systems Applications (CESA'96), Symposium on Discrete Events and Manufacturing Systems, Lille, pp. 716–721, July 1996.

[TOG, 01] A. Toguyeni et O.Korbaa, "Surveillance Indirecte par le flux d'une production cyclique ", Modélisation des Systèmes Réactifs (MSR), Toulouse, pp. 361-376, 2001.

[TOG, 02] A. Toguyeni, K. Kouissi et M. Combacau, "Supervision d'atelier", Chapitre 4 de "Fondements du pilotage des systèmes de production", Edité par J. P. Kieffer et P. Pujo, Traité IC2 – Série Systèmes Automatisés, Ed. Hermès, Paris, 2002.

[TOU, 04] L. Toursi et N. Sauer, "Branch and Bound Approach for Marking Optimization Problem of Weighted Marked Graphs", IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetic, The Hague, Vol. 2, pp. 1777–1782, 2004.

[TRU, 92] E. Teruel, P. Chrzastowski, J.M. Colom et M. Silva, "On Weighted T-Systems", Lecture Notes in Computer Science, 3th International Conference on Applications and Theory of Petri Nets, Sheffield, Vol. 616, pp. 348–367, 1992.

[TRU, 05] L. H. Trung, "Utilisation d'ordres partiels pour la caractérisation de solutions robustes en ordonnancement", Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Janvier 2005.

[VAL, 01] Robert Valette, "Cours sur les réseaux de Petri", Septembre 01. www.laas.fr/robert/enseignement.d

[VAN, 03] D. Van De Ville, M. Nachtegael, D. Van der Weken, E. Kerre et W. Philips, "Noise Reduction by Fuzzy Image Filtering", IEEE Transactions on Fuzzy System, Vol. 11, n°4, pp. 429–436, August 2003.

[VAN, 04] F. Vanderhaegen, "Analyse et contrôle de l'erreur humaine", Lavoisier – Hermès Science Publication, Paris, 2004.

[VEN, 03] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin et S. Kavuri, "A review of process fault detection and diagnosis. Part I: Quantitative model-based methods", Computers & Chemical Engineering, Vol. 27, n° 3, pp. 293–311, 2003.

[WAL, 91] P. Walley, "Statistical reasoning with imprecise probabilities", Chapman and Hall, London, 1991.

[ZAD, 89] L. Zadeh, "Knowledge Representation in Fuzzy Logic", IEEE Transactions on Knowledge And Data Engineering, Vol 1, n° 1, pp. 89-100, March 1989.

[ZAM, 97] E. Zamai, "Architecture de surveillance commande pour les systèmes à événements discrets complexes", Thèse de Doctorat, Université de Toulouse 3, Toulouse, Septembre 1997.

[ZWI, 95] G. Zwingelstein, "Diagnostic des défaillances - Théorie et pratique pour les systèmes industriels", Traité des Nouvelles Technologies, Série Diagnostic et Maintenance, Edition Hermès, Paris, 1995.

Résumé

Le travail proposé dans cette thèse s'intéresse aux ateliers manufacturiers à contraintes de temps de séjour. Nous supposons dans l'étude que les ressources ont déjà été affectées et que l'ordre des opérations est déjà fixé par le module de planification/ordonnancement. Les hypothèses de fonctionnement répétitif avec et sans postes d'assemblage sont adoptées. De manière assez classique pour ce type de problématique, le formalisme utilisé est celui des réseaux de Petri P-temporels pour l'étude des instants de débuts et fins des opérations.

La gestion des perturbations temporelles et la contribution à une nouvelle approche de surveillance des systèmes manufacturiers à contraintes temporelles, constituent les principales contributions de nos travaux de recherche.

L'étude de la robustesse des ateliers manufacturiers à contraintes de temps, constitue par ailleurs partie substantielle de ce mémoire. Dans ce contexte, les travaux présentés s'attachent à construire une approche de commande robuste. La contribution de ce mémoire est la caractérisation analytique de la capacité à rejeter des perturbations temporelles en utilisant une couche de commande exploitant les degrés de liberté du système.

Nous présentons alors trois approches de commande robuste face aux perturbations temporelles. La première consiste à générer par la commande un décalage temporel de même nature que la perturbation afin d'éviter la mort de marques aux niveaux des transitions de synchronisation du modèle RdP P-temporel. La deuxième, constitue notre contribution, se propose de rejeter la perturbation dès son observation en jouant sur la commande. Une troisième approche (combinaison des deux précédentes) a été détaillée. Une étude comparative de l'efficacité de ces trois stratégies est développée. Une validation sur un atelier de production laitière est effectuée.

Concernant la robustesse passive, un algorithme de calcul agrégeant les robustesses locales a procuré une borne supérieure. Cet algorithme tient en considération la transmission d'une perturbation sur deux chemins parallèles dans le modèle, ce que ne faisait pas la proposition de N. Jerbi.

Concernant la surveillance, une autre contribution de nos travaux de recherche, consiste à concevoir un système de surveillance; capable de détecter, localiser et diagnostiquer toute défaillance, susceptible d'affecter la production et ceci le plus tôt possible. La fonction de surveillance que nous développons, s'inscrit dans un processus global de supervision d'un système en cours de fonctionnement. Elle vise à partir des informations disponibles sur ses modes de fonctionnement, à détecter, à localiser et à diagnostiquer les défaillances qui peuvent affecter ses performances et sa sûreté de fonctionnement.

Afin de gérer les alarmes, nous avons proposé un filtrage flou, intégrant le savoir faire d'un expert de l'atelier et la connaissance des plages de robustesse dans l'interprétation des comptes rendus en provenance de l'atelier. Ce filtrage permet de préserver la fonction de production sur une plage étendue et de poursuivre la production dans un mode qualifié de dégradé, fournissant des garanties de qualité et de sûreté satisfaisante.

Mots clés **– atelier à contraintes de temps - RdP P-temporel - perturbation temporelle, robustesse - filtrage floue des comptes-rendus – chronique - surveillance distribuée - arbre des défaillances flou.**