

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Automatique
Spécialité : Automatique

Présenté par : Taibi Hadjar
Dinar Sarah

Thème

**Diagnostic des systèmes décrits par les
réseaux de Petri à base d'observateurs.**

Soutenu publiquement, le 06 / 07 / 2022, devant le jury composé de :

M. B. CHERKI	Professeur	ESSA. Tlemcen	Président
M. F. ARICHI	MCA	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
M. S.M. ABDI	MCB	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
M. R. MOKHTARI	MCA	ESSA. Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire :2021 /2022

Résumé :

Avec l'évolution de la technologie, l'homme a procédé à la conception de systèmes de plus en plus complexes mais aussi de plus en plus sensibles aux défauts qui peuvent les affecter. Une procédure de diagnostic contribuant au bon déroulement du processus est ainsi nécessaire. Dans ce contexte, le but de ce travail est le diagnostic des systèmes à événements discrets modélisés par des Réseaux de Petri partiellement observables (RdPPO). Nous basons sur la construction d'un observateur à entrée inconnue et nous supposant la connaissance de certaines places et de certaines transitions. L'idée principale est de représenter les marquages et les transitions de RdPPO comme des états d'un système descripteur linéaire. Ensuite, nous proposons des algorithmes de détection des défauts utilisant les résultats de la comparaison entre les places et transition estimés du système défaillant fournis par l'observateur et ceux du système normal.

Mots Clés : Observabilité, Observateurs, Réseaux de Petri, Systèmes à événements discrets et diagnostic.

Abstract:

With the evolution of technology, man has proceeded to design systems that are more and more complex but also more and more sensitive to defects that may affect them. A diagnostic procedure contributing to the smooth running of the process is thus necessary. In this context, the goal of this work is the diagnosis of discrete event systems modeled by partially observable Petri nets (POPON). We base our work on the construction of an observer with unknown

input and we assume the knowledge of some places and transitions. The main idea is to represent the markings and transitions of POPN as states of a linear descriptor system. Then, we propose fault detection algorithms using the results of the comparison between the estimated places and transitions of the faulty system provided by the observer and those of the normal system.

Keywords : Observability, observers, Petri nets, discrete events systems et diagnostic.

المخلص:

ومع تطور التكنولوجيا شرع البشر في تصميم نظم متزايدة التعقيد وأكثر عرضة للعيوب التي قد تؤثر عليهم. وهذا يتطلب إجراء تشخيصي من شأنه أن يساعد في ضمان سير العملية بسلاسة. وفي هذا السياق فإن الهدف من هذا العمل يتلخص في تشخيص أنظمة الأحداث المنفصلة التي يمكن ملاحظتها جزئياً من خلال شبكات بيترى. نحن نعتمد على بناء مراقب دخل مجهول ونحن نفرض معرفة بعض الأماكن والتحويلات. والفكرة الرئيسية هي تمثيل علامات وتحويلات لشبكات البيترى الملاحظة جزئياً كحالات نظام وصفي خطي. ثم نقترح خوارزميات كشف الأخطاء باستخدام نتائج المقارنة بين الأماكن والفترة الانتقالية المقدرة من النظام المعيب الذي قدمه المراقب والنظام العادي.

الكلمات المفتاحية: قابلية الملاحظة، المراقبين، شبكات بيترى، أنظمة أحداث منفصلة والتشخيص.

Remerciements

Avant tout nous remercions dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volanté, la patience et la force nécessaire, pour affronter toutes les difficultés durant la préparation de ce modeste mémoire.

Mes remerciements les plus vifs et chaleureux, vont à mon directeur de mémoire Monsieur ARICHI Fayssal pour son aide, son orientation judicieuse et sa disponibilité, aussi pour la confiance, la patience et la compréhension qu'il m'a toujours manifesté.

Nous tenons également à remercier Monsieur le Professeur CHERKI Brahim pour l'honneur qu'elle m'a fait en acceptant de participer à ce jury en tant que président.

Nous remercier M.ABDI Sidi Mohamed et M.MOKHTARI Mohamed Rida, qui ont aimablement accepté d'examiner ce travail et de faire partie du jury de soutenance. Mes vifs remerciements à tous mes enseignants qui ont sus nous donner une formation didactique et appréciable tout au long de notre cursus. Nous tenons tout particulièrement à remercier toute ma famille pour son soutien moral et pour l'appui inconditionnel qu'elle m'a toujours apporté.

Nous voudrions aussi remercier tous mes amis, pour leur aide sympathique tant sur le plan, scientifique que humain et pour la bonne humeur dans laquelle ce travail a été accompli.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont pu m'aider dans la réalisation de ce travail et être présents à mes côtés tout au long de cette étude.

Dédicace :

Je dédie ce modeste travail qui est le fruit de plusieurs Années d'étude à :

A mon très cher père

qui est aujourd'hui absent à mes yeux, mais toujours présent dans mes pensées et mon esprit. J'aurais espéré qu'il soit présent aujourd'hui dans ce monde , il aurait apprécié cet humble geste comme preuve de reconnaissance de la part d'une fille qui a toujours prié pour le salut de son âme. Puisse Allah le tout puissant et Miséricordieux accorder à mon père sa Sainte Miséricorde et l'accueillir en son vaste Paradis.

A ma très chère mère

Tu as toujours été pour moi un exemple de la mère respectueuse, de la personne méticuleuse, je tiens à honorer la femme que tu es. Grâce à toi Mama, j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité. Je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité et ta compréhension. Ton soutien fut une lumière dans tout mon parcours. Aucune dédicace ne saurait exprimée l'amour, l'estime et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Ce modeste travail est le fruit de tous les sacrifices que tu as déployé pour mon éducation et ma formation. Je t'aime maman et j'implore le tout-puissant pour qu'il t'accorde une bonne santé et une vie longue et heureuse.

A mes chers frères et sœurs

Pour leur dévouement, leur compréhension et leur grande tendresse, qui m'ont encouragé tout le long de mes études, m'ont consacré beaucoup de temps et disponibilité, et qui par leur soutien, leurs conseils et leur amour, m'ont permis d'arriver jusqu'à ici ,car ils ont toujours cru en moi. Merci de m'avoir toujours soutenu et merci pour tous les bons moments passés ensemble, et ce n'est pas fini.

A TOUTE MA FAMILLE TAIBI et FATMIA

Aucun langage ne saurait exprimé mon respect et ma considération pour votre soutien et encouragements. Je vous dédie ce travail en reconnaissance de l'amour que vous m'offrez quotidiennement et votre bonté exceptionnelle. Qu'Allah, le tout puissant, vous garde et vous procure santé et bonheur.

A ma chère binôme

Dinar Sarah, je ne peux trouver les mots justes et sincères pour t'exprimer mon affection et mes pensées, tu es pour moi, une vraie sœur, sur qui je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble ,j'espère que la vie lui réservera le meilleur.

mes chère(e) amis(e)

Assala, Ines, Amina, Chaimaa, Naouel ,Salma, Hibat ,Asmaa Nari-mané , Hakima , Ihcene et Seif El Islam je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

"HADJER"

Dédicace :

Je tient c'est avec un grand plaisir que je dédie ce modeste travail :

A ma mère qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'étude. Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance.

A mon père Mohammed, qui nous a quittés un peu trop tôt. J'espère qu'il me regarde de la haut et qui'il est aussi fière de moi qu'au première jour, tu as toujours accompagné mes pensé.

A mon frère Nacer, aucun mot ne pourrait exprimer l'attachement, l'amour et la tendresse que j'éprouve pour vous, que dieu te garde.

A mes chères sœurs et mes nièces Ferial, Loujayn, Ayaat, Rinad pour l'amour q'elles me réservent. Je leurs souhaite une vie pleine de bonheur et de séccés.

A mon chère binôme Hadjer et à toute sa famille.

A tout mes amis

Aucun hommage ne pourrait à la hauteur de l'amour dont il ne cesse de nous combler. Vous êtes des parties de nos familles sur qui je pouvons compter.

SARAH

Table des matières

Table des figures	9
Liste des tableaux	11
Introduction générale	13
1 Généralités sur les systèmes à événements discrets	17
1.1 Introduction	17
1.2 Systèmes à événements discrets	17
1.2.1 Propriétés des systèmes à événements discrets	18
1.3 Automate à états finis	19
1.3.1 Langage et automate	20
1.4 Les Réseaux de Petri	23
1.4.1 Notations et définitions de base	23
1.4.2 Marquage d'un RdP.	25
1.4.3 Franchissement d'une transition et séquence de franchissement.	25
1.4.4 Propriétés structurelles et comportementales des RdP	28
1.4.5 Analyse des propriétés d'un réseau de Petri	31
1.4.6 Extension des Réseaux de Petri	32
1.5 Conclusion	34
2 Diagnostic des SED modélisés par des réseaux de Petri	35
2.1 Introduction	35
2.2 Principe du diagnostic	35
2.2.1 Définitions et terminologies	37
2.3 Diagnostic des systèmes à événements discrets	40
2.3.1 Méthodes de diagnostic selon les outils de représentation	40
2.4 Diagnostic selon la modélisation des défauts	43
2.4.1 Diagnostic selon la structure de prise de décision :	44
2.5 Comparaison des méthodes de diagnostic des SED	46
2.6 Conclusion	48
3 Synthèse d'observateur à entrées inconnues pour les RdPPO	49
3.1 Introduction	49
3.2 Définitions et notations de base	49
3.2.1 Réseaux de Petri partiellement observables	49
3.2.2 Représentation d'état d'un RdPPO	50
3.2.3 Rappel sur les systèmes descripteurs	52

3.3	Synthèse d'un observateur à entrée inconnue	54
3.3.1	Marquages et estimation des transitions	54
3.3.2	Estimation de la séquence de franchissement	57
3.4	Exemple de Simulation	58
3.4.1	Exemple 1	58
3.5	Conclusion	60
4	Diagnostic de systèmes décrits par des réseaux de Petri partiellement observable	61
4.1	Introduction	61
4.2	Formulation du problème	61
4.2.1	Défauts des places	61
4.2.2	Défauts des transitions	62
4.3	Diagnostic des défauts	63
4.3.1	Diagnostic de défaut de transition	63
4.3.2	Diagnostic de défaut de places	64
4.3.3	Diagnostic des défauts de places et de transitions	66
4.4	Résultats de simulations	68
4.5	Conclusion	75
	Conclusion générale et Perspectives	77
	Bibliographie	79

Table des figures

1.1	Changement d'état par occurrence des événements dans un SED	19
1.2	Graphe de transition d'états d'un automate fini.	21
1.3	Automate à états finis déterministe.	22
1.4	Modèle RdP d'une machine à trois états.	24
1.5	Un exemple d'un RdP.	25
1.6	Franchissement d'une transition.	26
1.7	Séquence de franchissement d'un RdP.	27
1.8	Réseaux de petri places –transitions.	27
1.9	Synchronisation et précédence dans un RdP.	29
1.10	Conflit ou pas.	29
1.11	Les propriétés structurelles d'un RdP.	30
1.12	Exemple de RdP persistant.	31
2.1	Principe général du diagnostic.	36
2.2	Phases principales de diagnostic.	37
2.3	Défaut permanent.	38
2.4	Défaut intermittent.	39
2.5	Défaut transitoire.	39
2.6	Diagnostic par réseaux de Petri (Matrice d'états du diagnostiqueur). .	43
2.7	Le principe de diagnostic centralisé.	44
2.8	Le principe de diagnostic décentralisé sans coordinateur.	45
2.9	Le principe de diagnostic décentralisé avec coordinateur.	45
2.10	Le principe de diagnostic distribué.	46
3.1	Le système de production	58
3.2	Le modèle RdP du système de production	58
3.3	Le mode réel et le mode estimé de p_3	59
3.4	Le mode réel et le mode estimé de p_4	60
4.1	Schéma fonctionnel de diagnostic des défauts d'un RdPPO	63
4.2	Modèle de RdP.	68
4.3	Mode normal et mode défaillant de p_2 , p_4 et t_2 respectivementn. . . .	70
4.4	Modèle de réseau de Pétri d'un système de fabrication.	70
4.5	Mode normal et mode défaillant de p_9 , p_{10} et p_{11} respectivement. . . .	74
4.6	Mode normal et mode défaillant de p_{12} et t_{12} respectivement.	74

Liste des tableaux

2.1	Comparaison des méthodes de diagnostic des SED	47
-----	--	----

Introduction Générale

Contexte et motivations

A partir des années 80, les notions de systèmes à événements discrets ont fait leur apparition et se sont imposés comme des modèles pertinents de beaucoup de systèmes industriels. Le mot discret ne signifie ni temps discret ni état discret, mais réfère à une dynamique composée d'événements, c'est les instants d'occurrence de ces événements qui importent le plus car, c'est à ces moments que le système change d'état. Le choix du modèle s'est porté sur les réseaux de Petri partiellement observable (RdPPO). Ce choix est motivé par la grande expressivité des RdPs, leur capacité de modélisation de différents types de systèmes ainsi que leurs fondements mathématiques solides.

Les SED sont souvent soumis à des perturbations telles que les bruits de mesure, les incertitudes de modélisation, les fautes et les perturbations externes qui les empêchent d'accomplir les tâches pour lesquelles ils ont été conçus. Le comportement fautif dans un SED se produit suite à l'occurrence d'un événement particulier désigné par faute. Une faute est donc un événement dont l'arrivée est aléatoire et qui provoque une déviation du comportement nominal pouvant aboutir à la défaillance du système. Il peut y avoir différentes sources de défauts, par exemple des erreurs de modélisation, des défauts de capteurs, des défauts d'actionneurs, du bruit. La défaillance se traduit par l'incapacité du système à délivrer le service pour lequel il a été conçu. Ainsi, pour garantir le bon déroulement d'un procédé et pour une action de maintenance proactive, un système de diagnostic est nécessaire. Il consiste à récupérer toutes les informations accessibles sur l'évolution du système puis à prendre des décisions sur la présence de défauts, leurs localisations et leurs gravités. Les techniques utilisées pour le diagnostic des RdPs dépendent des informations disponibles sur le système ainsi que leurs détection et localisation sont effectuées seulement en se basant sur un ensemble d'événements observés.

Les outils ainsi que les techniques utilisées pour atteindre l'objectif du diagnostic changent d'une communauté à une autre. Ils dépendent souvent du système à diagnostiquer. Par conséquent, la diversité des approches proposées au long de ces dernières années rend la problématique de diagnostic de défauts également complexe. Dans notre travail nous nous intéressons particulièrement aux méthodes basées sur la théorie des observateurs après avoir modélisé les états de dysfonctionnement. Les méthodes de diagnostic à base d'observateurs ont reçu une attention particulière de la communauté scientifique à cause de leur efficacité. Différents types d'observateurs ont été utilisés dans ce but. Le principe fondamental de diagnostic des défauts à base d'observateurs consiste à estimer, ou reconstruire, les variables internes et/ou

externes dont la déviation en dehors d'une plage de référence est révélatrice de l'apparition d'un phénomène anormal. Le fonctionnement estimé est "comparé" avec un fonctionnement de référence attendu en l'absence de défauts.

Objectifs de la mémoire :

Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse traitent le problème de diagnostic des RdPs étiquetés (RdPEs) partiellement observables par estimation d'états. Les défauts du système sont modélisés par un ensemble de transitions non observables, et l'occurrence de certains défauts est équivalente au tir des transitions non observables associées. Il existe également des transitions non observables qui présentent des comportements normaux. La procédure de diagnostic est déclenchée suite à l'observation d'une séquence de transitions observables à partir d'un marquage initial connu.

Notre objectif est alors de développer une approche de diagnostic à base d'estimation d'état qui essaye d'éviter ces écueils par une nouvelle description du problème qui permette la détection et la localisation rapide des défauts.

Organisation des chapitres :

Ce mémoire est structuré de la manière suivante :

Le premier chapitre de ce mémoire est un chapitre introductif qui vise à donner une revue de la littérature sur les SED dans lesquels nous souhaitons orienter nos travaux. D'abord, nous présenterons quelques outils habituellement utilisés pour la modélisation des SED telle que les automates à états finis et les RdP, en signalant que notre attention s'est particulièrement portée sur les modèles dont la partie événementielle s'appuie sur les réseaux de Petri.

Le deuxième chapitre, permis de présenter quelques définitions concernant la terminologie utilisée dans le domaine de diagnostic des défauts. Cette terminologie nous sera nécessaire que ce soit dans le présent chapitre ou dans le chapitre suivant. Dans ce contexte, une classification des défauts qui peuvent avoir lieu dans un système est également faite. La deuxième partie est consacrée à un état de l'art non exhaustif des méthodes de diagnostic et des classifications qui a été faite selon plusieurs critères (Outil de modélisation, Modélisation des défauts, structure du diagnostic...etc.). L'état de l'art présenté dans ce chapitre va nous permettre de positionner notre travail de recherche par rapport aux approches présentées.

Le troisième chapitre, traite le problème de la synthèse d'observateurs pour les RdPPO avec des entrées inconnues. Pour cela nous donnons une représentation formelle des RdPPO, et puisque nous pouvons représenter les RdPPO sous forme d'un système descripteur, nous allons aborder le problème d'estimation d'état pour les RdPPO basés sur les principes de la synthèse d'observateurs pour les systèmes descripteurs. Nous terminons par des résultats de simulation afin de montrer l'efficacité

de l'approche proposée.

Dans le quatrième de chapitre, nous étudions le problème du diagnostic des défauts dans RdPPO. Notre objectif est de détecter et d'identifier les défaillances qui ont pu se produire à la fois dans les places et les transitions. Ainsi, nous présentons des algorithmes pour détecter ces défauts basés sur la comparaison estimation des transitions et des marquages du système défectueux fournie par un observateur algébrique avec ceux du système normal.

Enfin une conclusion générale et des perspectives seront données.

Chapitre 1

Généralités sur les systèmes à événements discrets

1.1 Introduction

Dans ce premier chapitre nous ferons un survol des aspects logiques des systèmes à événements discrets (SED). Nous évoquerons tout d'abord quelques notions relatives aux langages formels. Puis nous présenterons brièvement les deux outils de base pour l'étude et la modélisation des SED à savoir les automates à état fini et les réseaux de Petri (RdP). Nous mettrons l'accent sur les RdP dans la mesure où c'est le modèle de base utilisé dans ce mémoire pour lequel on donnera les principales propriétés.

1.2 Systèmes à événements discrets

Un système à événements discrets est un système dans lequel l'espace des états est discret. Un tel système est à opposer à un système continu pour lequel l'état est représenté par des grandeurs qui prennent des valeurs dans un domaine continu.

Les SED sont des systèmes qui sont fondamentalement asynchrones, c'est-à-dire que ceux-ci ne sont pas cadencés par une horloge. La dynamique de ces systèmes est assurée par l'occurrence des événements, ils se produisent de manière instantanée. En l'absence d'événement, l'état du système demeure inchangé et l'évolution du temps entre deux occurrences ne provoque aucun effet détectable sur le système. L'évolution d'un SED peut être décrite par un ensemble de couples : (e,t) où "e" représente un événement et "t" représente l'instant d'occurrence de cet événement. Un ensemble ordonné de couples constitue ce que l'on appelle une séquence. Une telle description se place à un niveau temporel dans le sens où l'instant d'occurrence des événements est une information considérée comme pertinente. En revanche, si l'on considère un modèle logique pour décrire le SED, seul l'ordre d'occurrence des événements importe[59].

En général, un SED peut avoir un comportement non déterministe. Nous entendons ici le "non-déterminisme" par le fait que nous ne pouvons pas prévoir, a priori, quelle sera l'évolution du système. En d'autres termes, pour un état donné du système, plusieurs événements différents sont supposés susceptibles de se pro-

duire. Donc une séquence unique ne suffit alors plus pour décrire le comportement du système. Ainsi, l'évolution d'un SED sera en général décrite par un ensemble de séquences d'événements. Cet ensemble de séquences constitue un langage sur l'ensemble des événements possibles dans le système. Dans la suite, nous nous intéresserons uniquement à des modèles logiques[59].

- **Spécification** : Avant de concevoir un système, il faut déterminer ce qu'on veut lui faire, que doit être sa réponse dans certain nombre de situations-type.
- **Conception, architecture** : Une fois spécifié le comportement fonctionnel du système, il faut le concevoir, notamment du point de vue de son architecture : composants, agencement et articulations, mécanismes de synchronisation et d'exécution.
- **Validation logique** : Il faut ensuite vérifier que le système ainsi conçu répond bien aux spécifications désirées, et qu'il n'engendre pas d'autres comportements indésirables.
- **Evaluation de performance** : A cette étape, la notion de temps intervient. On cherche alors à répondre à des questions du type : combien d'événements d'un type donné se produisent en une heure ? à quelle date de produira le nième événement ?
- **Ordonnancement** : L'ordonnancement a pour but d'établir des politiques de priorité, de routage. destinées à résoudre les problèmes posés par les phénomènes de concurrence[43].

1.2.1 Propriétés des systèmes à événements discrets

Les systèmes dynamiques à événements discrets (SDED) ou plus largement, les systèmes à événements discrets, satisfont aux deux propriétés suivantes :

- L'espace d'état est un ensemble discret.
- Le mécanisme de transition d'état est piloté par les événements.

Un SED est un système à états discrets, piloté par les événements, c'est-à-dire, l'évolution de son état dépend entièrement de l'occurrence d'événements discrets asynchrones dans le temps. Un événement représente indifféremment une action (une personne appuyant sur un bouton d'urgence), un début ou une fin de tâche (fin de cycle de nettoyage d'une machine à laver). Un événement peut être provoqué par un être humain, par une machine, par la nature ou par toute combinaison possible d'actions[11].

La figure suivante montre un exemple d'une trajectoire d'un système à événement discret :

La trajectoire est constante par morceaux, et le changement d'un état à un autre se fait par l'occurrence d'un événement. Dans cette trajectoire, on peut remarquer que :

- Des événements différents (e_2 et e_6) peuvent conduire à un même état.
- Des événements (e_3) peuvent se produire et être inactifs pour le système.

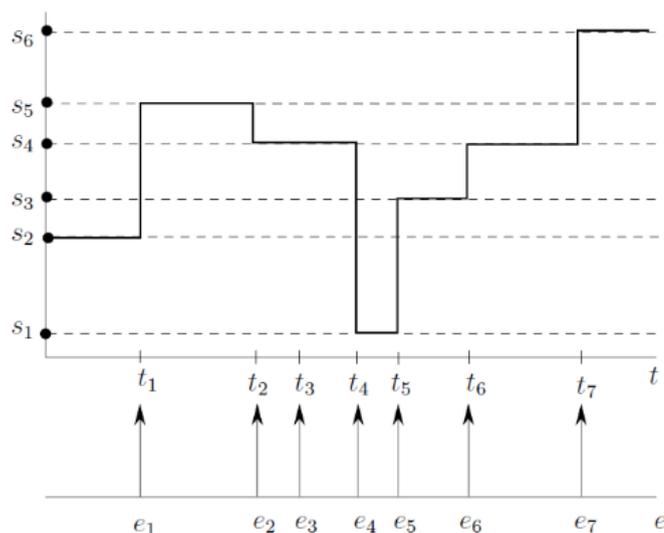


FIGURE 1.1 – Changement d'état par occurrence des événements dans un SED

De nombreux systèmes, en particulier les systèmes technologiques, sont en fait des systèmes à événement discrets. Même si ce n'est pas le cas, pour de nombreuses applications d'intérêt, une vue à événement discrets d'un système complexe peut être nécessaire. Voici quelques exemples simples de systèmes à événement discrets :

- L'état d'une machine peut être sélectionné dans un ensemble tel que $\{\text{ON}, \text{OFF}\}$ ou $\{\text{BUSY}, \text{IDLE}, \text{DOWN}\}$.
- Un ordinateur exécutant un programme peut être considéré comme étant dans l'un des trois états suivants : $\{\text{ATTENTE D'ENTRÉE}, \text{EXÉCUTION}, \text{ARRÊT}\}$. En outre, l'état RUNNING peut être décomposé en plusieurs états individuels, par exemple, de la ligne de code en cours d'exécution à un moment donné.
- Tout type d'inventaire constitué d'entités discrètes (par exemple, des produits, des unités monétaires, personnes) possède un espace d'état naturel dans les entiers non négatifs $\{0, 1, 2, \dots\}$.
- La plupart des jeux peuvent être modélisés comme ayant un espace d'état discret. Aux échecs, par exemple, chaque configuration possible du plateau définit un état, l'espace d'état résultant est énorme, mais il est discret[?].

L'étude des SED peut être menée avec différents outils tels que : les langages de programmation parallèle/temps réel, les modèles dynamiques algébriques, comme l'algèbre Max Plus, les automates à états finis et les RdP. Ces deux derniers seront présents en détail dans la suite de ce chapitre.

1.3 Automate à états finis

La technique la plus ancienne et la plus classique pour représenter les comportements dynamiques d'un SED est d'utiliser un automate à états finis. Un automate fini (on dit parfois machine à états finis), en anglais finite state automaton ou finite state machine (FSA, FSM).

Un automate à états finis est constitué d'états et de transitions. Son comportement est dirigé par un mot fourni en entrée : l'automate passe d'état en état, suivant les transitions, à la lecture de chaque lettre de l'entrée. Un automate fini possède un nombre fini d'états distincts : il ne dispose donc que d'une mémoire bornée. Une automate à état fini peut être représentée graphiquement par un graphe étiqueté. Les états sont des cercles et les transitions sont des flèches orientées de leur état de départ vers leur état de destination [24]. Avant de présenter les automates à états finis, nous rappelons quelques notions de base de la théorie des langages.

1.3.1 Langage et automate

1.3.1.1 Événement , chaîne et langage

Pour formaliser les systèmes à événements discrets sous forme de langage, on représente les événements par des symboles. L'ensemble de tous ces symboles $(\sigma_1, \dots, \sigma_n)$ est fini et constitue un alphabet noté Σ .

Toutes les séquences finies d'événements, ou trace, peuvent alors être représentées par une séquence de symboles $s = \sigma_1.\sigma_2\dots$ appelée chaîne (ou mot) sur l'alphabet Σ .

On appelle alphabet (ou vocabulaire), un ensemble fini de symboles noté Σ . Dans le cas d'un SED, l'alphabet pourra représenter l'ensemble des événements possibles dans le système. Cet ensemble est composé de tous les événements qui font évoluer le SED.

Une chaîne (ou mot ou séquence) définie sur un alphabet Σ est une suite finie d'éléments de Σ notée s [2], fabriquée par concaténation, s_1, s_2, \dots, s_n de symboles inclus dans Σ . Pour la simplification, l'écriture $s_1 s_2$: est considéré comme équivalente à $s_1.s_2$. Le mot vide est un mot particulier et est communément noté ε .

L'ensemble de tous les mots qu'il est possible de créer avec les symboles de l'alphabet Σ est appelé Σ^* (ε est inclus dans Σ^*).

Un langage noté L , est un ensemble de mots constitués avec les symboles de l'alphabet Σ . Par conséquent, un langage L est inclus ou égal à l'ensemble Σ^* constitué par tous les mots réalisables sur l'alphabet Σ [4].

La relation entre un système et sa traduction sous forme de langage peut être comme Suite :

- Événement : symbole $\sigma \in \Sigma$
- Trace : séquence s
- Comportement du système : langage L

De façon générale, un automate est une machine qui a des entrées et des sorties discrètes et qui réagit à une modification de ses entrées en changeant ses sorties. Formellement un automate fini A peut être défini de la façon suivante :

Définition 1. *Un automate fini A est un quintuplet $A = (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m)$ où :*
 Q est l'ensemble fini des états.

Σ est un ensemble fini de symboles d'entrée (ensemble des événements), appelé alphabet d'entrée.

δ est la fonction de transition d'états de $Q \times \Sigma \rightarrow Q$ qui associe un état d'arrivée q_k , à un état de départ q_i et à un symbole d'entrée $\sigma_j : \delta(q_i, \sigma_j) = q_k$.

$q_0 \in Q$ est l'état initial.

$Q_m \subseteq Q$ est l'ensemble des états marqués (états finaux).

1.3.1.2 Représentation graphique

Un automate à états finis peut être décrit par son graphe de transition d'états. Dans ce graphe :

- Les états sont symbolisés par des cercles : l'état initial est figuré par un cercle avec une flèche entrante et les états finaux sont indiqués par des doubles cercles.
- La fonction de transition d'états est représentée par des arcs orientés associés aux événements de Σ .

La figure (1.2) représente le graphe de transition d'états d'un automate fini.

Nous pouvons identifier $Q = \{q_0, q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6, q_7, q_8\}$, $\Sigma = \{a, b, c\}$ et $Q_m =$

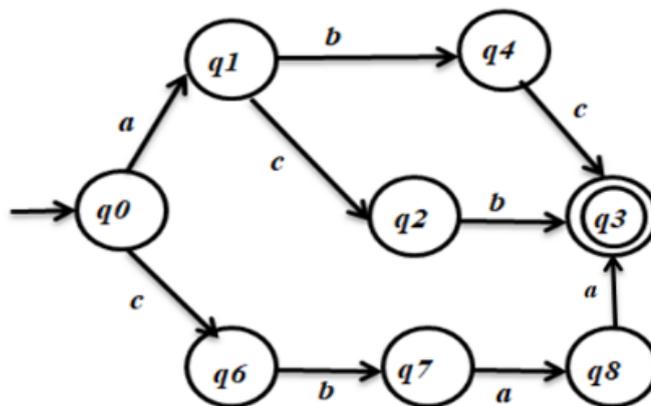


FIGURE 1.2 – Graphe de transition d'états d'un automate fini.

$\{q_3\}$. La transition d'état $\delta(q_0, a) = q_1$ est figurée par un arc orienté de q_0 à q_1 et étiqueté par le symbole a .

La fonction de transition d'état est définie par :

$$\begin{aligned}
 \delta(q_0, a) &= q_1 \\
 \delta(q_0, c) &= q_6 \\
 \delta(q_1, b) &= q_4 \\
 \delta(q_1, c) &= q_2 \\
 \delta(q_2, b) &= q_3 \\
 \delta(q_4, c) &= q_3 \\
 \delta(q_6, b) &= q_7 \\
 \delta(q_7, a) &= q_8 \\
 \delta(q_8, a) &= q_3
 \end{aligned}$$

Remarque 1. Dans le cas de ce modèle, la fonction de transition d'état est partielle, dès lors qu'elle n'est pas définie pour tout élément de produit cartésien $Q \times \Sigma$. Par exemple $\delta(q_0, b) = \emptyset$.

1.3.1.3 Automate déterministe

Un automate est dit déterministe, si l'état initial est unique, et si la relation de transition, appliquée à un couple (q_0, σ) , définit toujours un état unique $\delta : Q \times \Sigma \rightarrow Q$.

On remarque que, l'automate de la figure (1.2) satisfait cette condition donc, il est déterministe.

1.3.1.4 Propriétés Accessibilité :

Un état $q \in Q$ est dit accessible s'il existe une chaîne $s \in \Sigma^*$ telle que $q = \delta(q_0, s)$, c'est à dire que l'automate peut y accéder depuis l'état initial. Par extension, l'automate A est accessible si tout états $q \in Q$ est accessible.

Co-Accessibilité :

Un état $q \in Q$ est dit co-accessible s'il existe une chaîne $s \in \Sigma^*$ telle que $\delta(q_0, s) \in Q_m$, c'est-à-dire qu'à partir de cet état l'automate peut atteindre un état marqué. Par extension, l'automate A est co-accessible si tout état $q \in Q$ est co-accessible.

Automate bloquant / non bloquant :

Un état $q \in Q$ est dit bloquant s'il est accessible mais pas co-accessible, Un automate A est dit non bloquant si tous ses états sont non bloquants.

Exemple 1. Soit l'automate suivant :

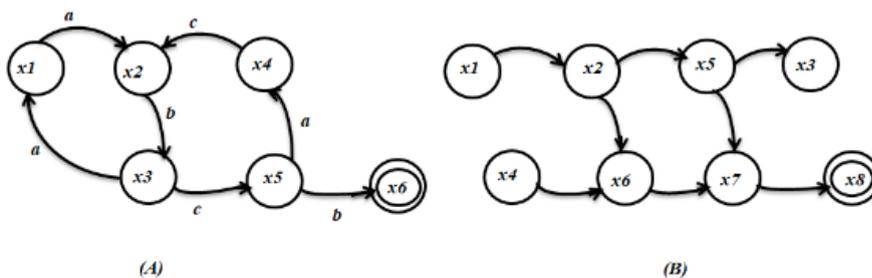


FIGURE 1.3 – Automate à états finis déterministe.

Dans l'automate A tous les états sont accessibles et co-accessibles. C'est pourquoi cet automate est accessible et co-accessible.

Dans l'automate B, les états $(x_1, x_2, x_3, x_5, x_6, x_8)$ sont des états accessibles mais x_4

n'est pas accessible. Aussi, tous les états de l'automate B sont co-accessibles sauf x_3 qui n'est pas co-accessible. Donc, l'automate B est ni accessible, ni co-accessible.

1.4 Les Réseaux de Petri

Dès leur création en 1962 par Carl Adam Petri, les réseaux de Petri (RdP) constituent un outil très approprié pour étudier les systèmes à événements discrets en raison de la puissance de modélisation et de leurs propriétés mathématiques. Les modèles obtenus, leur représentation graphique de la structure du système étudié, permettent une analyse des propriétés et par conséquent une validation de leurs spécifications [50]. Par leur relation avec les automates à états finis, qui représentent un puissant formalisme de modélisation des SED, leurs avantages sont néanmoins atténués par leur grande sensibilité au problème de l'explosion combinatoire du nombre d'états (même dans le cas de systèmes simples), la modélisation par RdP offre la possibilité de dépasser cet inconvénient, en fournissant des structures de modélisation beaucoup plus riches. En outre, les RdP sont aussi plus adaptés à la modélisation des activités distribuées au sein des systèmes complexes, permettant une représentation beaucoup plus concise et claire des différents sous-systèmes impliqués et de leurs interdépendances [2].

Dans la suite, nous présentons d'abord les concepts de base des RdP et les notations correspondantes, utilisées dans la suite de ce travail.

1.4.1 Notations et définitions de base

Un réseau de Petri est un graphe orienté comportant un ensemble fini de places (symbolisées par des cercles) et un ensemble fini de transitions (symbolisées par des traits), avec des arcs orientés qui assurent la liaison d'une place vers une transition ou d'une transition vers une place. Les transitions, les places et les arcs reliant celles-ci définissent les composants de base de la structure graphique d'un RdP. L'ensemble des places permet de représenter l'état du système et l'ensemble des transitions sont associées à des événements dont l'occurrence provoque le changement d'état du SED [32].

Autrement dit, un RdP est un graphe biparti, c'est-à-dire qu'il y a alternance des places et des transitions sur un chemin formé d'arcs consécutifs. Et tout arc doit obligatoirement avoir un nœud à chacune de ses extrémités.

Un exemple de RdP d'une machine à trois états est illustré à la figure (1.4). Un exemple de réseau de Petri est illustré dans la figure (1.4) où l'ensemble des places est $P = \{p_1, p_2, p_3\}$, avec p_1 représentant l'état d'arrêt, p_2 l'état de marche, et p_3 l'état de panne. Les transitions, $T = \{t_1, t_2, t_3\}$, représentent respectivement, début de cycle d'usinage, fin de cycle d'usinage, panne et la réparation de la machine.

Définition 2. *Un RdP ordinaire non marqué est défini par un quadruplet $R = \{P, T, Pré, Post\}$ tel que :*

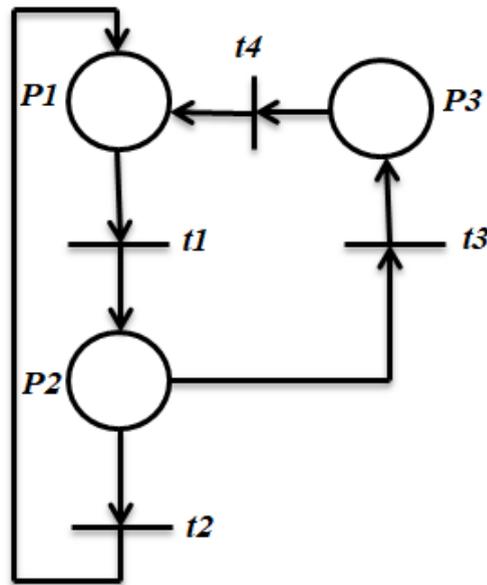


FIGURE 1.4 – Modèle RdP d’une machine à trois états.

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ est un ensemble fini et non vide de places.
- $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ un ensemble fini non vide de transitions . $P \cap T = \emptyset$ c’est-à-dire que les ensembles P et T sont disjoints (avec $P \cup T \neq \emptyset$).
- $Pré : P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ est la fonction de pré-incidence qui précise le poids d’arcs dirigés des places vers les transitions (appelés arcs ”Pré”) et est représentée par une matrice $m \times n$.
- $Post : P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ est la fonction de post-incidence qui spécifie le poids de arcs dirigés des transitions vers les places (appelés arcs ”Post”) et est représentée par une matrice $m \times n$.
- $Pré(P_i, T_j)$ est le poids de l’arc $P_i \rightarrow T_j$, ce poids est égal à 1 si l’arc existe et 0 sinon.
- $Post(T_j, P_i)$ est le poids de l’arc $T_j \rightarrow P_i$.

Les applications ”Pré” et ” Post” sont relatives à la transition T_j du couple (P_i, T_j) .

Remarque 2. Lorsque le poids des éléments dans les matrices $Pré$, $Post$ est soit nul, soit égal à 1, le réseau est dit *sauf*.

Définition 3. Un RdP généralisé \mathcal{R} est défini comme un RdP ordinaire non marqué R , sauf que : $Pré : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ et $Post : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$ (\mathbb{N} est l’ensemble des entiers naturels).

Les applications $Pré$ (respectivement $Post$), font correspondre à tout couple $(p_i, t_j) \in P \times T$ (respectivement $(t_j, p_i) \in P \times T$) un entier qui est le poids de l’arc.

Lors de la représentation graphique, en règle générale, si un arc n’a pas de poids associé (appelé aussi *valuation*), c’est que ce poids vaut 1, sinon l’arc est biffé et une *valuation* lui est attribuée.

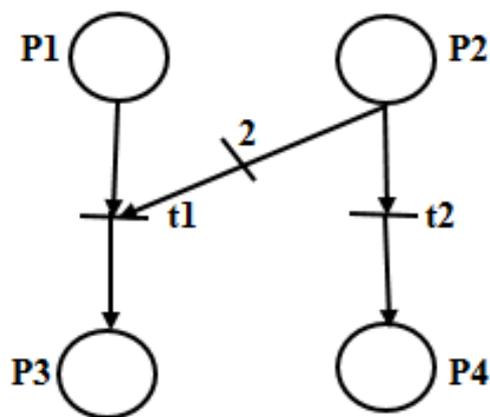


FIGURE 1.5 – Un exemple d'un RdP.

Exemple 2. Soit le RdP de la figure (1.5).

On a $\text{Pré}(p_1, t_1) = 1$, $\text{Pré}(p_2, t_1) = 2$, $\text{Pré}(p_2, t_2) = 1$. $\text{Post}(t_1, p_3) = 1$, $\text{Post}(t_2, p_4) = 1$.

1.4.2 Marquage d'un RdP.

Chaque place pourra contenir à un instant donné une plusieurs ou pas de marques (jetons). La distribution des jetons dans les places détermine le marquage du réseau. Ce marquage M associe un nombre entier $M(p_i)$ (positif ou nul) à chaque place p_i du réseau. On dira qu'un marquage M est binaire si toutes les places du réseau contiennent au plus un jeton.

Définition 4. (Réseau de Petri marqué) :

Un RdP marqué est défini par $\langle \mathcal{R}, M \rangle$ avec \mathcal{R} un RdP généralisé, M une application de P dans \mathbb{N} où pour toute place $p_i \in P$, $M(p_i)$ est le nombre de marques contenues par la place p_i . Le marquage initial est noté M_0 .

Les notations suivantes sont adoptées :

*t_j : l'ensemble des places en amont de la transition t_j (appelées aussi places en entrée de t_j).

t_j^* : l'ensemble des places en aval de la transition t_j (appelées aussi places en sortie de t_j).

*p_j : l'ensemble des transitions en amont de la place p_i (appelées aussi transitions en entrée de p_i).

p_j^* : l'ensemble des transitions en aval de la place p_i (appelées aussi transitions en sortie de p_i).

1.4.3 Franchissement d'une transition et séquence de franchissement.

L'évolution du marquage simule la dynamique de système. Ce changement d'état se fait par franchissement d'une transition. Le franchissement d'une transition peut

s'effectuer seulement si les places en amont de cette transition contiennent au moins un nombre de jeton égale au poids de l'arc reliant la place à la transition. Une transition t_j est validée si et seulement si :

$$M(p_i) \geq \text{Pré}(p_i, t_j)$$

avec $p_i \in {}^*t_j$ et *t_j représente l'ensemble de places en amont de t_j . Le franchissement d'une transition validée modifie le marquage des places en amont et en aval de cette transition. Le franchissement d'une transition a pour conséquences le retrait d'un nombre de marques égale aux poids des arcs pour les places en amont de cette transition et l'ajout d'un nombre de marques égale aux poids des arcs pour les places en aval. Si le RdP considéré est ordinaire alors, le nombre de marques à ajouter et à retirer est égal à 1. La figure (1.6) illustre le franchissement d'une transition.

Une séquence de franchissement σ est représentée par une suite de transitions va-

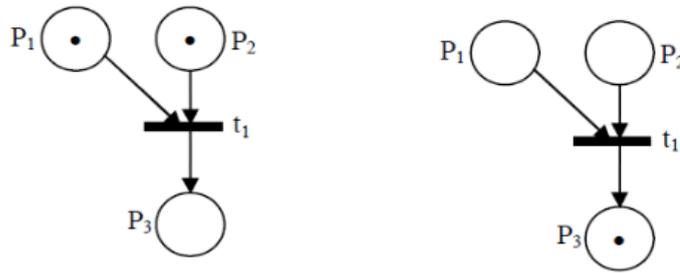


FIGURE 1.6 – Franchissement d'une transition.

lidées et franchies séquentiellement à partir d'un marquage donné. Si nous considérons le RdP de la figure (1.7) et son marquage initial $M_0 = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$, nous dirons que nous sommes passés de M_0 à $M_3 = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$ en effectuant le tirage de la séquence $\sigma = \langle t_1 t_2 t_3 \rangle$ et nous écrivons $M_0 \xrightarrow{\sigma} M_3$.

Le nouveau marquage M' obtenu par le franchissement de la transition t_j est donné :

$$M'(p_i) = M(p_i) - \text{Pré}(p_i, t_j) + \text{Post}(t_j, p_i) \tag{1.1}$$

Avec l'application d'incidence avant Pré peut être représentée par une matrice $n \times m$ ($n = |P|$ et $m = |T|$) notée $W^- \in \mathbb{N}^{n \times m}$ comme suit :

$$W^-(p_i, t_j) = \begin{matrix} & t_1 & \cdots & t_m \\ \begin{matrix} p_1 \\ \vdots \\ p_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} \text{Pré}(p_1, t_1) & \cdots & \text{Pré}(p_1, t_m) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \text{Pré}(p_n, t_1) & \cdots & \text{Pré}(p_n, t_m) \end{bmatrix} \end{matrix}$$

L'application d'incidence arrière peut être représentée par une matrice notée $W^+ \in \mathbb{N}^{n \times m}$ comme suit :

$$W^+(p_i, t_j) = \begin{matrix} & t_1 & \cdots & t_m \\ \begin{matrix} p_1 \\ \vdots \\ p_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} \text{Post}(p_1, t_1) & \cdots & \text{Post}(p_1, t_m) \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ \text{Post}(p_n, t_1) & \cdots & \text{Post}(p_n, t_m) \end{bmatrix} \end{matrix}$$

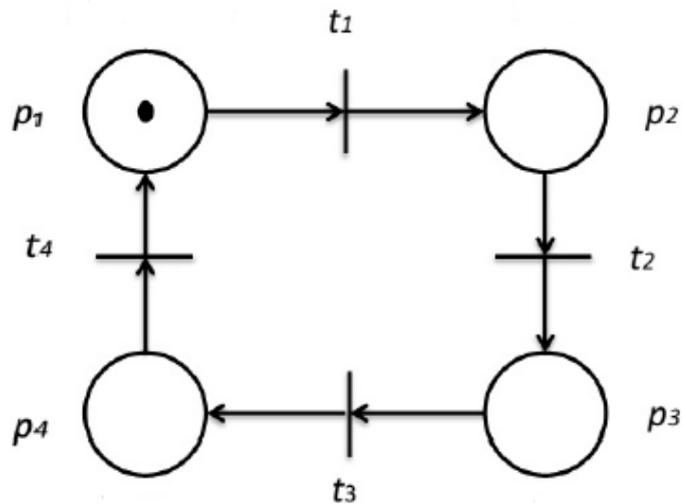


FIGURE 1.7 – Séquence de franchissement d'un RdP.

On peut alors introduire la matrice d'incidence $W \in \mathbb{N}^{n \times m}$ telle que :

$$W(p_i, t_j) = \text{Post}(t_j, p_i) - \text{Pré}(p_i, t_j) \quad \forall p_i \in P \quad \text{et} \quad \forall t_j \in T$$

$$W = W^+ - W^-$$

On en déduit alors que l'équation fondamentale qui permet de représenter l'évolution du marquage d'un RdP M s'écrit comme suit

$$M_k = M_i + W\sigma$$

Nous appelons une séquence de franchissement une suite de transitions qui sont franchissables successivement. A chaque séquence de franchissement, on associe un vecteur caractéristique noté σ . C'est un vecteur de dimension m (le nombre de transitions) où, la composante numéro j correspond au nombre de franchissements de la transition t_j dans la séquence S .

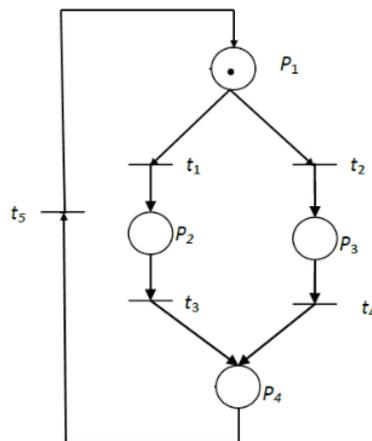


FIGURE 1.8 – Réseaux de petri places –transitions.

Exemple 3. Soit RdP de la figure (1.8). Le vecteur du marquage initial est donné

$$\text{par } M_0 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

A partir du marquage initial de ce RdP, on peut avoir les séquences de transitions suivantes :

$$S_1 = \langle t_1 t_3 t_5 \rangle \text{ ou } S_2 = \langle t_2 t_4 t_5 \rangle.$$

On associe un vecteur caractéristique (le vecteur de franchissement) à chacune

$$\text{de ces séquences. Le vecteur caractéristique de } S_1 \text{ est } \sigma_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$\text{et celui de } \sigma_2 \text{ est } \sigma_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

$$\text{La matrice d'incidence avant de ce RdP est : } W^- = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\text{celle d'incidence arrière est : } W^+ = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\text{et la matrice d'incidence est : } W = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Le franchissement de la séquence σ_1 depuis le marquage initial permet d'atteindre le marquage

$$M_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

1.4.4 Propriétés structurelles et comportementales des RdP

Dans cette section, Nous présentons quelques propriétés des RdP :

1.4.4.1 Les propriétés structurelles

Les propriétés dépendent uniquement de la structure du réseau. Il s'agit ici de faire ressortir les propriétés statiques du système étudié. Les différentes propriétés sont indépendantes du marquage. Ainsi, il est possible de faire apparaître, entre autres, les caractéristiques de synchronisation (a) ou de précedence (b) (1.9).

Parmi les propriétés structurelles nous pouvons citer :



FIGURE 1.9 – Synchronisation et précédence dans un RdP.

- **Les conflits** dans un RdP (figure 1.10), lorsqu'une place se trouve en amont de plusieurs transitions. On note le conflit de la place P_i : $K = (p_i, \{t_1, t_2, \dots\})$; Où K est l'ensemble des marquages accessibles $K =^* M_0$ et t_1, t_2, \dots sont les transitions en concurrence.

On parle de conflit structurel car cela ne dépend pas du marquage. Dans certains cas, le franchissement de l'une des transitions peut empêcher le franchissement de l'autre. Le conflit devient conflit effectif quand il y a effectivement conflit, cela dépend du marquage.

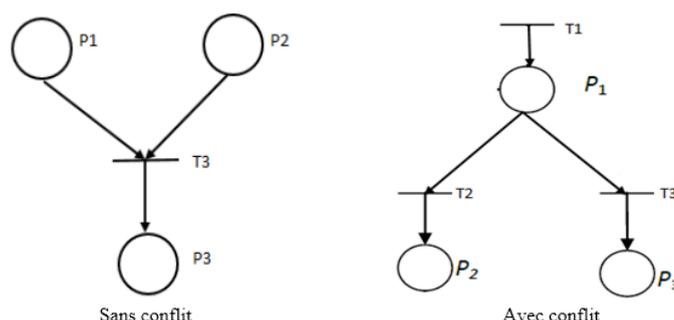


FIGURE 1.10 – Conflit ou pas.

- **Le choix libre** dans un RdP (figure 1.11(a)) : lorsque pour tout conflit $K = (P_i, \{t_1, t_2, \dots\})$, aucune des transitions ne possède d'autres places d'entrée que P_i .
- **RdP simple** (figure 1.11 (b)) : lorsque chaque transition n'est concernée que par un conflit au plus.
- **RdP pur** (figure 1.11 (c)) : lorsqu'il n'existe pas de place amont d'une transition qui soit aussi une place aval.
- Un RdP est **un graphe d'état** (figure 1.11(d)) : lorsque toute transition de cet RdP a une place d'entrée et place de sortie.
- Un RdP est **un graphe d'événement** (figure 1.11(e)) : lorsque toute place de cet RdP a exactement une transition d'entrée et une transition de sortie.

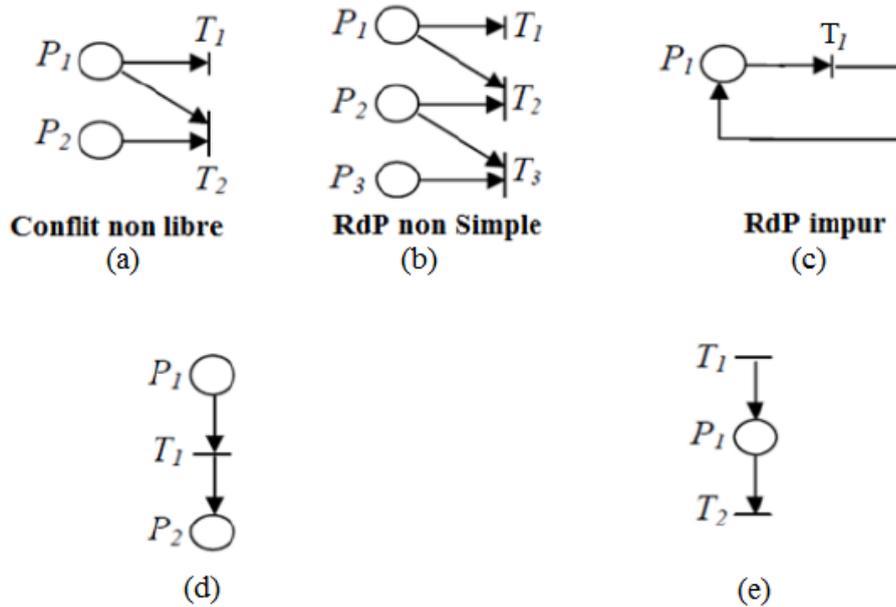


FIGURE 1.11 – Les propriétés structurelles d’un RdP.

1.4.4.2 Les propriétés comportementales

Ces propriétés dépendent à la fois du marquage initial M_0 et de la structure du réseau. Parmi les propriétés comportementales nous pouvons citer :

- **L’accessibilité** : un marquage M_i est dit accessible à partir du marquage M_0 , s’il existe (au moins) une séquence exécutable S qui mène de M_0 à M_i , c’est-à-dire $M_0[S]M_k$, l’ensemble de marquages accessibles à partir de M_0 est noté par $*M_0$.
- **Le blocage** : lorsqu’un marquage ne valide aucune transition. Le RdP ne peut plus évoluer. On parle alors d’état puit ou de blocage mortel.
- **La persistance** : (Figure 1.12) un RdP est appelé persistant si, pour n’importe quelle paire de transitions validées, le franchissement de l’une ne rend pas l’autre infranchissable.
- Le RdP **borné** : 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 égal à k (on dit que p_i est k - bornée). Un RdP est borné pour un marquage initial M_0 si toutes les places sont bornées pour M_0 (le réseau est k - borné si toutes les places sont k - bornées).
- Le RdP **sauf** : lorsque pour tout marquages les places contiennent au plus un jeton.

- Le RdP **conservatif** : lorsque le nombre de jetons reste inchangé quel que soit le marquage.
- Le RdP **vivant** : lorsque toutes les transitions sont franchissables par une séquence de tirs à partir de n'importe quel marquage atteignable par le marquage initial M_0 .
- Le RdP **quasi-vivant** : lorsque toutes les transitions sont franchissables par une séquence de tir à partir du marquage initial M_0 .
- Un RdP a un **état d'accueil** M_a : lorsque pour un marquage initial M_0 si pour tout marquage accessible $M_i \in^* M_0$, il existe σ_i tel que $M_i[\sigma_i]M_a$.
- Le RdP **réinitialisable** : lorsque pour tout marquage M_i atteignable par le marquage initial M_0 , il existe au moins une séquence de tir permettant de revenir au marquage initial M_0 [38].

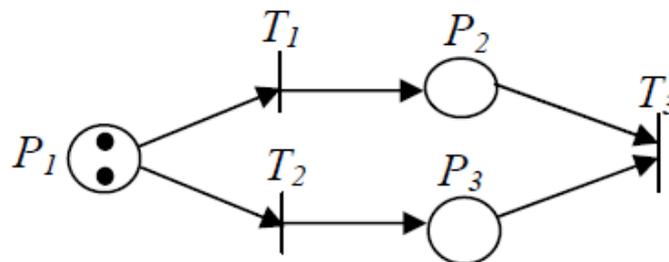


FIGURE 1.12 – Exemple de RdP persistant.

1.4.5 Analyse des propriétés d'un réseau de Petri

Pour vérifier qu'un réseau de Pétri possède ces propriétés, il existe trois méthodes principales :

- l'analyse par énumération (Arbre de couverture et énumération de marquages) ;
- l'analyse structurelle (Calcul des composantes) ;
- l'analyse par transformation (Réduction).

1.4.5.1 Analyse énumérative

L'analyse énumérative permet la validation d'un RdP. Elle consiste à établir le graphe des marquages accessibles du réseau. Ce graphe d'accessibilité se compose de nœuds, correspondant aux marquages accessibles, et d'arcs, correspondant aux franchissements des transitions permettant le passage d'un état à un autre.

Dans le cas d'un réseau borné, le graphe d'accessibilité est donc fini, et les propriétés facilement vérifiées. Par contre, dans les cas d'un réseau non borné, le graphe

sera infini et impossible à construire. On utilise alors un autre graphe appelé graphe de couverture.

Cette méthode est donc parfois difficile, voire impossible à appliquer en raison de l'explosion combinatoire du nombre d'états.

1.4.5.2 Analyse structurelle

L'analyse structurelle se base sur l'algèbre linéaire puisqu'on se base sur l'équation d'état permettant d'utiliser des algorithmes étudiant les propriétés du RdP. Ces méthodes reposent sur la recherche d'invariants, qui permettent de caractériser les propriétés des marquages atteignables et des transitions franchissables, quelle que soit l'évolution du marquage.

Il existe deux types d'invariants :

- les p -invariants, également appelés p -semiflats ou composantes conservatives.
- les t -invariants, également appelés t -semiflats ou séquences répétitives.

Ils permettent de repérer les comportements cycliques, ces séquences de franchissement permettent de revenir au marquage initial lorsqu'elles sont appliquées à celui-ci.

1.4.5.3 Analyse par transformation

Dans le cas de RdP de grande taille, l'analyse des propriétés peut devenir difficile à cause de l'explosion combinatoire du nombre d'états. Il peut ainsi être judicieux de diminuer la taille du RdP marque initial afin d'étudier une propriété particulière au moyen de règles de réduction. Dans ce cas, le RdP réduit ne peut s'interpréter comme le modèle d'un système ; il ne sert qu'à l'étude d'une propriété particulière.

1.4.6 Extension des Réseaux de Petri

Contrairement à d'autres formes de modélisation, notamment les réseaux de file d'attente, les premiers résultats fournis par les RdP sont de nature qualitative. Depuis les années 1970, le concept de RdP a été largement développé par de nombreux auteurs à travers le monde, intégrant notamment des aspects temporels et stochastiques dans les modèles initiaux. La théorie des graphes et la théorie des processus stochastiques sont donc utilisées pour l'évaluation des performances. Citons des œuvres de Brams [7], Murata [53], Zhou [68], et d'autres. [1], Wang [64], Lindemann [48], Diaz [25] et Haas [35], qui traitent de la théorie, de la pratique et des applications des réseaux de Petri. Des articles et des écrits tels que [53] et [19] décrivent les mutations que les réseaux de Petri ont subies depuis leur création. Les paragraphes suivants sont consacrés à la présentation de quelques extensions à la définition initiale des RdP.

1.4.6.1 Réseaux de Petri temporisés :

Les RdP temporisés introduisent la notion de temps dans le processus réseau, ce qui permet de décrire un système à événements discrets dont le fonctionnement dépend du temps [64].

Il existe deux grandes familles de RdP étendus en temps : les RdP temporels introduits par Ramchandani [55] et les RdP temporisés introduits par Merlin [51]. Pour les RdP temporisés, les temporisations ont d'abord été associées aux transitions (T-temporisés), puis aux places (P-temporisés). La temporisation représente alors la durée minimale de franchissement ou le temps de séjour minimum d'un jeton dans une place [62]. Les RdP T-temporisés fonctionnent de la manière suivante : lorsqu'un jeton franchit une transition, celui-ci est réservé pendant un certain temps. C'est seulement après ce temps d'attente que le jeton franchira effectivement la transition. Les RdP T-temporisés et P-temporisés sont équivalents. Concernant les RdP temporels, l'extension temporelle s'exprime sous la forme d'un intervalle associé principalement aux transitions (T-temporel) [51], ou aux places (P-temporel). Contrairement aux RdPs P-temporisés et T-temporisés, l'expressivité des RdPs T-temporels et P-temporels n'est pas équivalente.

1.4.6.2 Réseaux de Petri stochastiques (SPN) :

Les RdP stochastiques ont été introduits par Florin dès 1978 pour répondre à certains problèmes d'évaluation liés à la sûreté de fonctionnement de systèmes informatiques. Ces problèmes faisant intervenir des phénomènes aléatoires, les transitions du RdP ont comporté des temps de franchissement aléatoires, distribués par une loi exponentielle. Cette distribution exponentielle permet d'exploiter les propriétés mathématiques d'un processus de Markov [62].

Bien entendu, le concept s'est largement développé depuis le début des années 1980 [54], [52], [28] pour répondre à des besoins de modélisation de plus en plus complexes, comme la modélisation des systèmes de production. Les concepts de base ainsi que les principales propriétés se retrouvent dans de nombreux ouvrages [35],[1], [48] et [25]. De nombreuses classes de RdP stochastiques sont proposées pour l'analyse des performances des systèmes de production.

Les caractéristiques des différentes classes de RdP stochastiques se situent essentiellement dans la nature des transitions utilisées. Initialement un RdP stochastique a toutes ses transitions temporisées avec un temps aléatoire qui est distribué avec une loi exponentielle.

1.4.6.3 Réseaux de Petri colorés :

Un RdP coloré est un RdP dans lequel le jeton est coloré. La couleur est une information attachée au jeton. Ces informations permettent de distinguer les jetons et peuvent être de tout type [37],[41]. Malgré leur forte utilité, les réseaux colorés n'offrent aucun pouvoir descriptif supplémentaire par rapport aux RdP classiques, ils permettent simplement de condenser les informations.

Tout RdP coloré étiqueté correspond à RdP qui lui est isomorphe. De nombreux auteurs ont développé des extensions aux types aléatoires : Color Random RdP [12] et Generalized Random Color RdP [27]. Ce type de RdP est essentiellement utilisé comme outil de simulation.

1.4.6.4 Réseaux de Petri continus et hybrides :

Les approximations continues des phénomènes et des variables sont intéressantes dans le cas de systèmes avec un grand nombre de ressources et/ou des temps de fonctionnement variables dans le temps. La modélisation continue traite les transferts physiques comme des flux et remplace donc les variables discrètes par des variables continues. En ce sens, les réseaux de Petri continus (RdPC) ont été introduits à partir de RdP discrets par David et Alla [18]. Les RdPC est constitué de places successives et de transitions successives, et son fonctionnement est lié à la notion de vitesse, liée aux transitions, qui peuvent être constantes ou variables. De tels RdP conduisent à une autre classe appelée (les RdP Hybrides). Le RdP hybride est une combinaison de la sémantique RdPC et de la sémantique RdP normale (discrète). Ils sont adaptés à la modélisation de systèmes dynamiques hybrides, et les RdPs Lots [22], [23] étendent les RdPs hybrides [20] en définissant un nouveau type de nœud, le nœud lot. Ils sont spécialement dédiés pour la modélisation et la simulation des systèmes de production à haute cadence ayant des éléments de transfert avec possibilité d'accumulation des entités (convoyeurs).

1.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un bref synopsis de la théorie générale des SED, en nous passons à la description des deux outils de modélisation et d'analyse des SED les plus largement utilisés qui sont les automates à état finis et les RdPs, nous accordons une attention particulière aux RdPs. Ce formalisme est caractérisé par des structures de modélisation beaucoup plus riches, sont plus adaptés pour la modélisation des activités distribuées au sein des systèmes complexes, et permettant aussi une représentation beaucoup plus pratique et claire des différents systèmes. La dernière partie du chapitre a été consacré sur les différents extensions des RdP utilisé pour la modélisation et l'analyse de comportement des systèmes.

Chapitre 2

Diagnostic des SED modélisés par des réseaux de Petri

2.1 Introduction

Le diagnostic est une branche importante de l'automatique puisqu'elle analyse le bon déroulement de l'évolution et de la production des processus. Le travail présenté dans ce chapitre s'inscrit dans le cadre de la théorie de diagnostic des SED modélisé par un RdPPO. Dans une première partie, nous exposons un ensemble de concepts et de terminologies importants pour le traitement de ce problème. La deuxième partie regroupe des résultats bien connus sur le diagnostic des SED. Quelques résultats classiques sur les SED modélisé par les automates à état finis, sont également exposés. Le travail le plus abordé dans ce chapitre est pour le diagnostic des RdPs qui fournissent une description graphique claire et un support mathématique simple.

2.2 Principe du diagnostic

Le diagnostic est une procédure qui consiste à détecter et localiser un composant où un élément défectueux dans un système dynamique. La structure générale d'une procédure de diagnostic est représentée sur la figure (2.1) où le module de diagnostic est alimenté par toute la connaissance disponible (observation et modèle) sur le système [5]. Cette connaissance inclut les mesures des variables et toute autre information pouvant être utile pour le diagnostic comme, par exemple, la structure du système. Le module de diagnostic traite les observations et produit un "diagnostic" qui est une liste de défauts possibles pouvant affecter le système au cours du temps.

Il existe un grand nombre de méthodes de diagnostic ([6], [8], [10], [21], [26], [61], [34]). Ces méthodes se basent sur un modèle du comportement normal et/ou défaillant du système. Chacune des méthodes de diagnostic doit garantir les caractéristiques suivantes :

- Le diagnostic doit être facile à implémenter.
- Le nombre de capteurs nécessaire pour le diagnostic doit être minimal.

- Le diagnostic doit être prédictif.
- Le diagnostic doit être réalisable en temps réel.
- Le diagnostic doit être concevable algorithmiquement.

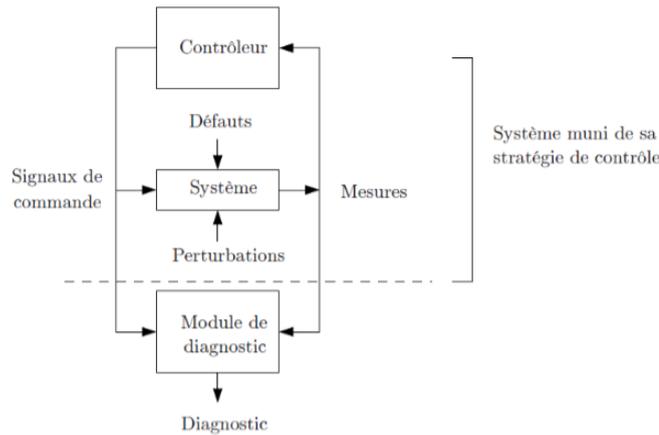


FIGURE 2.1 – Principe général du diagnostic.

En générale, pour détecter les éléments défectueux d'un système, un certain degré de redondance est requis. La redondance désigne le fait de disposer d'une même information de plusieurs manières. Cette redondance est utilisée pour effectuer des tests de cohérence entre les variables mesurées elles-mêmes ou entre les variables mesurées et le modèle du système. Dans les applications dites à haut risque, telles que les systèmes de commande et de surveillance des centrales nucléaires ou les systèmes de pilotage et de navigation des avions, la redondance peut être assurée au moyen de mesures supplémentaires, d'où le nom de la redondance matérielle. Un composant critique, un capteur par exemple, est alors doublé ou triplé et une procédure de vote majoritaire permet de savoir lequel est en défaut ou non. La redondance matérielle a l'avantage d'être fiable et donne un rendement élevé, mais cette approche a des inconvénients physiques liés au poids et à l'espace occupé par le matériel ajouté ainsi que des inconvénients économiques car elle engendre un surcoût.

Le système diagnostic peut se faire en trois phases principales suivantes : détection, localisation et identification de défauts (Figure 2.2).

1. **Détection** : Cette étape consiste à découvrir l'apparition de toute anomalie de fonctionnement dans le système surveillé et de déterminer l'instant de son occurrence.
2. **Localisation** : Cette phase vient après la phase de détection de défauts, qui circonscrit la défaillance à un sous-ensemble du système surveillé. Elle analyse les événements pour distinguer ceux qui sont anormaux. Elle localise la ou les défaillances réelles, elle permet de déterminer le bloc défaillant sans forcément se situer au niveau de l'organe défectueux.

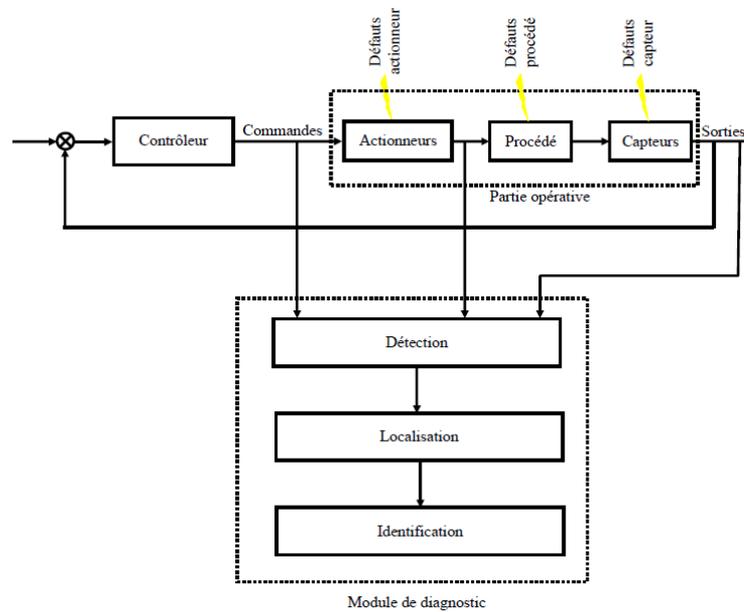


FIGURE 2.2 – Phases principales de diagnostic.

3. **Identification** : C'est la dernière phase du diagnostic, qui détermine la taille et le comportement temporel d'un défaut, autrement dit, l'estimation des caractéristiques statiques et dynamiques de ce défaut : amplitude permanente, évolution dynamique du défaut.

2.2.1 Définitions et terminologies

L'objectif est de présenter les concepts fondamentaux liés au diagnostic. Dans la littérature du diagnostic, on peut trouver plusieurs définitions quelque fois divergentes. C'est la raison pour laquelle nous donnons les définitions des mots clés nécessaires pour la compréhension de ce mémoire.

Les observations :

- **Une observation** est une information obtenue sur le dispositif réel. Cette information peut être obtenue soit à une entrée, soit à une sortie du dispositif ou encore entre deux composants de celui-ci.
- **Un symptôme** est un phénomène qui survient sur un dispositif et qui révèle un dysfonctionnement.
- **Le syndrome** est un ensemble de symptômes caractéristiques d'un fonctionnement. Ainsi certains fonctionnements sont diagnostiqués plus rapidement s'ils sont associés à un syndrome caractéristique.

Les anomalies :

- **Un défaut** : C'est un écart d'un élément d'un système de son comportement normal. Il n'entraîne pas nécessairement le dysfonctionnement du système mais laisse envisager une probable défaillance. Dans la littérature, les défauts sont classés selon plusieurs critères [40] :
- Composant responsable.
- Dynamique d'occurrence.

1. **Selon le composant responsable** : En prenant comme critère de classification "le composant responsable de l'occurrence de défauts", on peut distinguer trois catégories principales de défauts (Figure 2.2).

- **Défauts capteur** :
Se caractérisent par un écart entre la valeur réelle de la grandeur et sa mesure.
- **Défauts d'actionneurs** :
Ils se traduisent par une incohérence entre les commandes et la sortie (la pompe délivre un débit incohérent avec sa caractéristique hydraulique).
- **Défauts de processus Physique** :
Défaillances dues à des modifications de la structure (fuite, rupture d'un organe,...) ou des paramètres du modèle (encrassement d'un tube d'un four, bouchage d'un tube,...).
- **Défauts du système (ou de l'algorithme) de commande**
Ils se caractérisent par un écart entre la valeur réelle de la sortie du contrôleur (selon l'algorithme implémenté) et sa mesure.

2. **Selon la dynamique d'occurrence** :

- **Défaut permanent** :
C'est un défaut qui est tout le temps présent. En général, il interfère en permanence sur le fonctionnement du système. Un défaut permanent est représenté par un signal de type échelon.

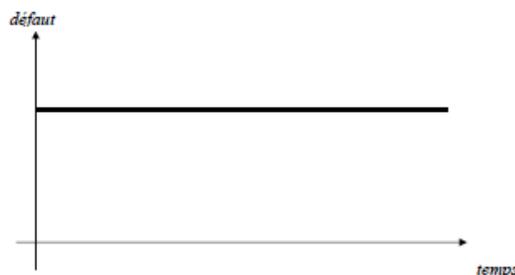


FIGURE 2.3 – Défaut permanent.

— **Défaut fugitif (ou intermittent) :**

C'est un défaut qui apparait et disparaît d'une façon aléatoire et surtout rapidement. Ils passent d'un état normal à défaillant plusieurs fois dans les deux sens.

Ils peuvent être la conséquence de mauvais contacts, câbles abimés, d'usure du capteur lui-même.

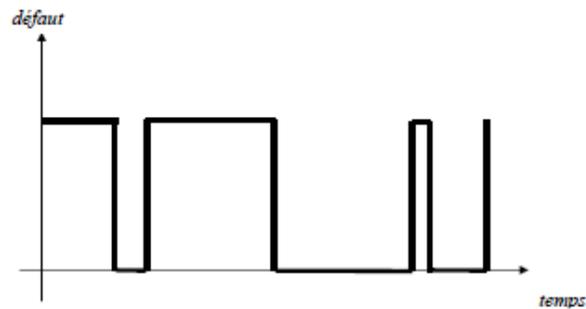


FIGURE 2.4 – Défaut intermittent.

— **Défaut transitoire :**

C'est un défaut qui se produit une seule fois et pendant une courte période de temps. Il n'est pas dû à un défaut de composant, mais a une ressource qui ne peut pas répondre temporairement aussi vite que prévu. Par exemple, il peut être dû à une ressource qui n'est pas disponible provisoirement.

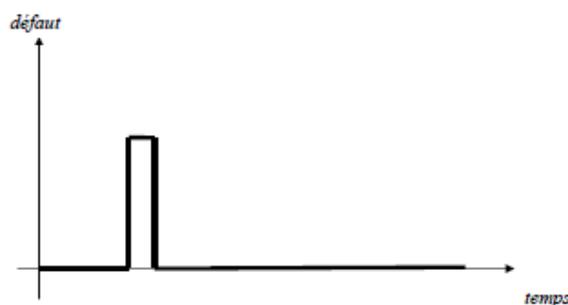


FIGURE 2.5 – Défaut transitoire.

Une défaillance : C'est une déviation d'un système par rapport à son comportement normal qui l'empêche de remplir sa fonction souhaitée. Une défaillance est le résultat de l'existence d'un ou plusieurs défauts. Par contre, la présence d'un défaut ne conduit pas obligatoirement à une défaillance.

Une dégradation : C'est le résultat d'un défaut non lié directement aux mécanismes du système, mais plutôt à des facteurs environnementaux (l'humidité, la température), ou à des facteurs liés à sa durée de vie. Dans ce cas, le système fonctionne sous son régime nominal et au-dessous d'un seuil d'arrêt. Une dégradation peut aboutir à une défaillance.

Une panne : C'est la conséquence d'une défaillance aboutissant à une interruption permanente. Lors de son fonctionnement, un système dynamique peut évoluer sous trois modes de fonctionnement : mode de fonctionnement normal, dégrad et défaillant.

Modélisation du défaut : Détermination d'un modèle mathématique pour décrire un effet spécifique du défaut.

Redondance analytique : Détermination d'une variable par la mesure ou par l'utilisation d'un modèle mathématique du processus considéré.

Modèle qualitatif : Un modèle de système décrivant le comportement avec des relations entre des variables et des paramètres du système en termes heuristiques tels que des causalités ou des règles.

Modèle quantitatif : un modèle de système décrivant le comportement avec des relations entre des variables et des paramètres du système en termes analytiques tels que des équations différentielles ou aux différences.

Résidu : Signaux portants de l'information, basés sur l'écart entre les mesures et les calculs basés sur le modèle.

Seuil : Valeur limite de l'écart d'un résidu par rapport au zéro, ainsi s'il est dépassé, un défaut est déclaré comme détecté.

2.3 Diagnostic des systèmes à événements discrets

Les méthodes de diagnostic des systèmes à événements discrets peuvent être généralement classées selon les outils de représentation, modélisation des défauts et structure de la prise de décision. Nous présentons dans cette partie quelques méthodes qui reposent sur un certain nombre de critères, à savoir l'outil de modélisation, le type de défauts et la structure de la prise de décision.

2.3.1 Méthodes de diagnostic selon les outils de représentation

Diagnostic à base d'automates à états finis

Dans le cadre du diagnostic des SED, plusieurs approches originales ont été proposées en utilisant les automates à états finis comme un outil de modélisation. En conséquence, on peut classer ces approches dans deux catégories principales : celles à base d'événements et celles à base d'états [42]. La première catégorie a été initialement proposée par Sampath dans [60] et est appelée diagnostiqueur. Elle comporte deux étapes principales. Dans la première étape un modèle à événements discrets représentant le comportement du système est construit. Dans cette phase, l'idée de base consiste à modéliser chaque composante élémentaire du système à l'aide des automates à états finis. Chaque automate représente les deux comportements normal et défaillant pour le composant correspondant. Dans la deuxième étape, le

modèle global issu de la synchronisation des modèles élémentaires du système est exploité pour la compilation (hors-ligne) du diagnostiqueur correspondant. Pour la deuxième catégorie qui a été proposée par [67], les auteures sont mises l'accent sur la détermination de l'état défaillant du système (occurrence des défauts) sans avoir besoin aux événements. Ils supposent que l'ensemble d'états du système peut être partitionné en fonction du comportement du système. Ces partitions sont définies par un seul mode de fonctionnement normal et plusieurs modes de fonctionnement. Afin d'effectuer un diagnostic à base d'état pour les SED, le modèle est augmentée pour inclure l'ensemble des sorties du système. Dans ce cas, l'état de fonctionnement du système est déduit de la séquence des sorties. Un diagnostiqueur à base d'états est illustré dans [67]. Chacun des états de ce diagnostiqueur contient une sortie du système, ses états possibles liés à cette sortie, et les modes de fonctionnements possibles du système associés à ces états. Dans cette approche, la compilation du diagnostiqueur ainsi que la définition de la diagnosticabilité se font de la même manière que dans l'approche à base d'événements.

Diagnostic à base de Réseaux de Petri

Les RdP sont utilisés pour le diagnostic des SED dans nombreuses approches. Ils sont enrichis (RdPs) temporisés, temporels, stochastiques, à marquage flou, colorés...) afin de mieux représenter l'évolution d'un système dynamique.

Dans le modèle RdP d'un système, certaines places peuvent être non bornées. Lorsqu'on dit " place non bornée" cela signifie que le nombre de jetons dans cette place n'est pas connu.

D'autre part, les transitions peuvent être observables ou non observables. En générale, dans les systèmes modélisés par un RdP, le problème de diagnostic consiste à déterminer la distribution des jetons dans le réseau de Petri dans les places bornées et non bornées (ou la séquence de tir des transitions non observables) en se basant seulement sur les informations observables du système.

Plus précisément, les auteurs de [63] ont construit des diagnostics de défauts uniquement à partir des variations de marquage dans les places observées avec l'hypothèse que certaines places sont observables et qu'aucune transition ne l'est, tandis que les auteurs de [15] ont construit des diagnostics de défaut basés non seulement sur les variations de marquage mais aussi sur les transitions observées, ils ont suivi une approche similaire à celui de [60] afin que les résultats précédents puissent être directement appliqués. Dans [31], une version distribuée de l'approche diagnostiqueur de [60] ont été proposés pour les réseaux de Petri bordés de place. Contrairement à ces applications directes de l'approche diagnostiqueur de [60], [33] construit des arbres d'accessibilité de base construits pour les réseaux de Petri étiquetés bornés (basés sur les notions de marquage de base et de justifications) afin que les défauts puissent être détectés.

Dans [45], des diagnostiqueurs minimaux (qui utilisent observations à partir d'un nombre minimal de place observables) ont été construits pour détecter et isoler immédiatement le déclenchement des transitions de panne.

Dans [57], les défauts sont modélisés comme des transitions d'état non observables. Plus précisément, ils considèrent le diagnostic des défauts dans les réseaux de Petri partiellement observable, c'est-à-dire les réseaux de Petri avec des capteurs de place, qui peuvent mesurer le nombre de jetons dans certains place (et peuvent donc donner des variations de marquage comme requis dans ([63];[15])), et des capteurs de transition (sous forme d'étiquettes) qui peuvent (éventuellement partiellement) indiquer le déclenchement de certaines des transitions.

Exemple 1 :

La figure (2.6(a)) représentant un RdP modélisant les fonctionnements normal et défaillant d'un procédé. À partir des places P_1 et P_2 , il est possible soit de tirer la transition t_2 possédant une étiquette indiquant que le défaut f a eu lieu et aboutissant à la place P_4 , soit de tirer t_2 correspondant à un événement non observable g pour arriver à la place P_3 . Pour isoler ce défaut, il faut pouvoir connaître toutes les situations possibles dans lesquelles ce système peut se trouver. À partir du modèle du procédé Geuc [30] réalise directement un diagnostiqueur sous la même forme que le RdP du procédé, la figure (figure2.6(b)). Il établit les différentes configurations du procédé à partir des observations possibles par différents types de jetons ($\Delta, \bullet, \square, *$). Ainsi, à partir du marquage initial du modèle RdP du procédé, il est possible d'avoir les initialisations suivantes correspondant au marquage des places :

- P_1 et P_2 par le jeton de type " \bullet " si aucun évènement n'a encore eu lieu.
- P_2 et P_3 par le jeton de type " \square " si l'évènement non observable g a eu lieu.
- P_4 par le jeton de type " Δ " si l'évènement de défaut f a eu lieu.
- P_2 et P_5 par le jeton de type " $*$ " si l'évènement g a eu lieu deux fois.

À partir de là, il est possible de définir une matrice des états initiaux X_{d0} représentant toutes les situations initiales possibles avec l'affectation des défauts qui leur est associée à la figure (2.6(c)). Par exemple, l'initialisation correspondant au tirage de la transition t_2 (2.6(b)) aboutit au marquage des places P_4 par le jeton. Ce tirage correspond à l'occurrence du défaut f . Dans la matrice des états initiaux X_{d0} , les colonnes correspondant à ces places, ainsi qu'au défaut f , ont la valeur 1 (2.6(c)).

Dans[57], par une transformation d'un RdPPO en un RdP étiqueté, les auteurs proposent une approche qui calcule le degré de confiance par rapport à l'occurrence des différents types de défauts. Une autre approche basée sur le calcul du degré de confiance des états et événements passés et futurs est donnée dans [46] pour résoudre à la fois les problèmes de diagnostic et de prédiction de fautes pour les RdPPO. Le même auteur dans [47] a utilisé le calcul de l'ensemble des séquences de de franchissement compatibles avec une observation donnée pour formuler des conditions suffisantes pour la détection et le diagnostic de RdPPO. Le travail dans [66] propose une technique pour diagnostiquer les défauts pour RdPPO basée sur une technique

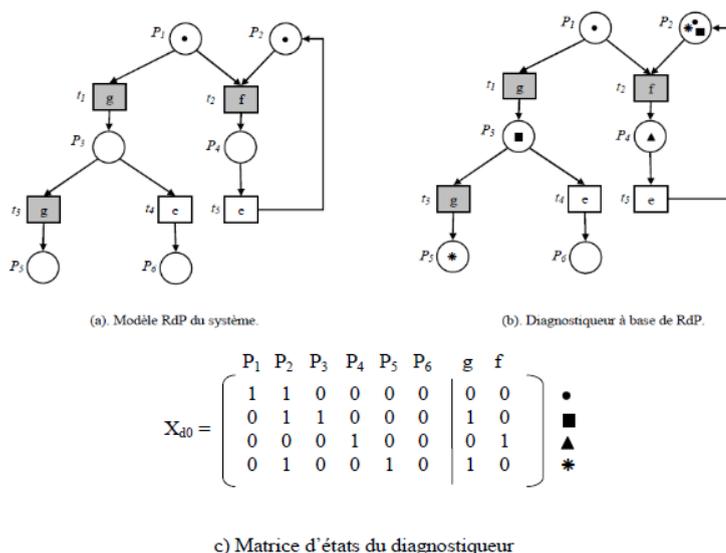


FIGURE 2.6 – Diagnostic par réseaux de Petri (Matrice d'états du diagnostiqueur).

de décodage algébrique sous l'hypothèse que les défauts se produisent à la fois dans les transitions et les places en même temps.

Dans [65], une approche qui intègre la redondance dans un RdP donné est proposée d'une manière à détecter et identifier les défauts en utilisant des techniques de codage/décodage en supposant que les défauts se produisent aux transitions et places.

En se basant sur les informations de structure d'un RdP, de transitions observables et en calculant le changement de jetons dans les places défectueuses, un algorithme de diagnostic de défaut supposant que les fautes peuvent être modélisés comme des transitions non observables est proposé dans [17].

Une méthodologie basée sur les relations de redondance analytique pour les SED partiellement observés décrits par les RdP étiquetés est présentée dans [14]. Les auteurs ont fourni des conditions nécessaires à l'existence de séquences non observables en vérification de la cohérence de la séquence de franchissement observée avec le modèle normal.

Dans [69], les auteurs proposent une approche pour identifier les défauts de transition pour les RdPPO en résolvant le problème de programmation linéaire (PPL) en nombre entier basé sur le modèle normal et l'observation anormale du système. Une autre approche basée sur la résolution d'un problème PPL est donnée dans [70] en supposant que le marquage de toutes les places sont connus.

2.4 Diagnostic selon la modélisation des défauts

Dans la littérature, les techniques utilisées pour le diagnostic des RdPs dépendent de la connaissance disponible sur le système ainsi que les défauts qui l'affectent

[3],[65], [13]. Pour la modélisation des défauts, nous trouvons les défauts à base d'événements, les défauts à base d'états et les défauts mixtes.

- **Défauts à base d'événements** : Les défauts sont modélisés par un ensemble de transitions du RdP et l'occurrence d'un défaut est équivalente au franchissement de la transition associée. La détection et l'isolement des défauts sont effectués en se basant uniquement sur les événements observés. Cette modélisation des défauts à base d'événements à l'avantage de pouvoir détecter des défauts du type intermittent [29], [56], [31].
- **Défauts à base d'états** : L'occurrence d'un défaut est équivalente à la variation du marquage du RdP déviant de son comportement nominal et qui est exprimée par des pertes ou des duplications de jetons. L'inconvénient de la modélisation des défauts à base d'états est qu'il n'est pas possible de détecter les défauts de type intermittent [65].
- **Défauts mixtes** : L'occurrence d'un défaut est la combinaison de franchissement des transitions des défauts et l'atteignable des états de défauts [65].

2.4.1 Diagnostic selon la structure de prise de décision :

Le choix de la structure de prise de décision de diagnostic peut être déterminé selon la distribution des composants du système et ses moyens d'observation et de contrôle. Il existe trois grandes structures de prise de décision des méthodes de diagnostic : centralisée, décentralisée et distribuée.

1. **Diagnostic centralisé** : La structure centralisée consiste à associer un modèle global du procédé avec un seul diagnostiqueur figure (2.7). Le module de diagnostic collecte les différentes informations sur le système et relève ses observations pour prendre sa décision finale sur l'état de fonctionnement du système (normal ou anormal).

La limitation majeure de cette structure est qu'elle peut aboutir à une explosion combinatoire. En plus, elle admet une faible robustesse.

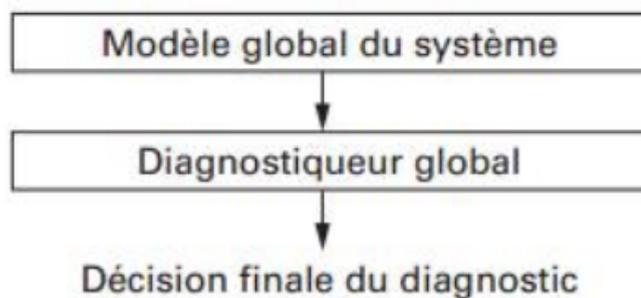


FIGURE 2.7 – Le principe de diagnostic centralisé.

2. **Diagnostic décentralisé sans coordinateur** : La structure décentralisée se base sur un modèle global du procédé à qui sont associés plusieurs diagnostiqueurs locaux indépendants figure(2.8). Chaque diagnostiqueur reçoit les observations qui lui sont spécifiques et prend une décision en se basant sur ses observations locales. Pour ce type de structure, on n'a pas besoin d'un coordinateur pour prendre une décision finale de diagnostic. Un inconvénient majeur de ce type de structure est qu'il peut aboutir à un problème d'indécision ou de conflit liés à l'observation partielle du procédé.

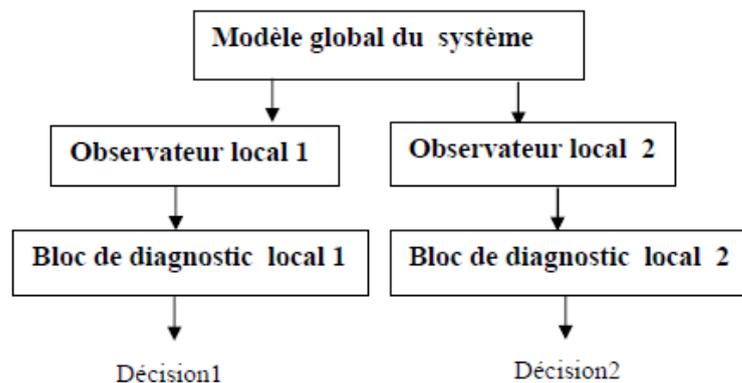


FIGURE 2.8 – Le principe de diagnostic décentralisé sans coordinateur.

3. **Diagnostic décentralisé avec coordinateur** : Afin de résoudre le problème d'indécision et permettre aux modules de diagnostic locaux de réussir leur diagnostic du système entier, un coordinateur doit être mis en œuvre pour la communication (communication limitée) entre les différentes décisions locales afin de prendre à la fin une décision finale qui a un aspect conditionnel.

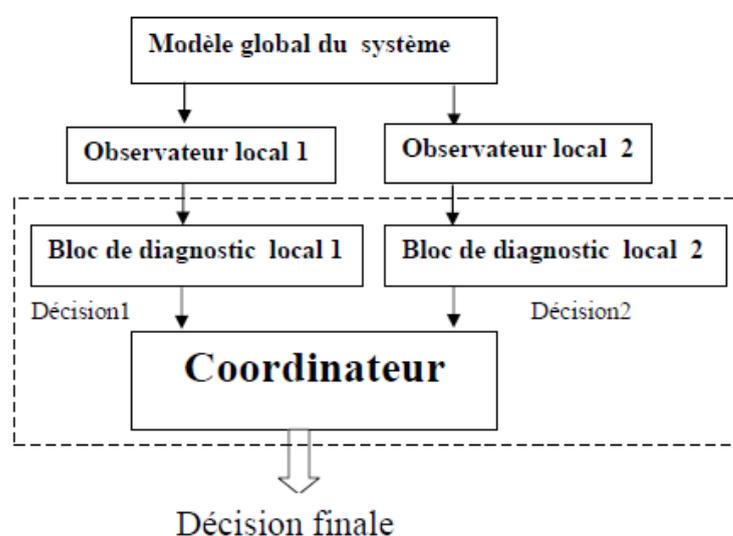


FIGURE 2.9 – Le principe de diagnostic décentralisé avec coordinateur.

4. **Diagnostic distribué** : Pour ce type de structure, le système à modéliser est un système décomposable en sous-systèmes indépendants (système multi-modèle). Un module de diagnostic local est associé à chaque sous-modèle qui reçoit les observations associées à ce sous-modèle. Afin de gérer les conflits décisionnels, un protocole de communication permet la communication entre les modules locaux de diagnostic.

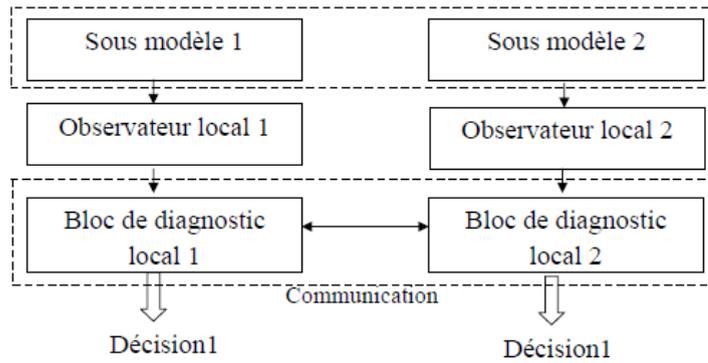


FIGURE 2.10 – Le principe de diagnostic distribué.

2.5 Comparaison des méthodes de diagnostic des SED

Le tableau suivante compare les différentes approches de diagnostic des SED selon les outils de modélisation, la manière de modéliser des défauts et la structure de prise de décision.

		Avantages	Inconvénients
Outil de modélisation	Automates	Description formelle, théorie des langages et outils de composition et de projection	Risque d'explosion
	Réseaux de Petri	Adaptés pour traiter les problèmes de synchronisation d'événements et le partage des ressources	Risque d'explosion
Modélisation des défauts	A base d'événements	Détection des défauts intermittents	Besoin d'initialiser le procédé et le diagnostiqueur au même instant
	A base d'états	Pas de besoin d'initialiser le procédé et le diagnostiqueur au même instant	pas de détection des défauts intermittents
Structure de prise de décision	Centralisée	Localisation précise	Localisation précise
	Localisation précise	Utilisation des diagnostiqueurs locaux	Besoin d'un modèle global du système
	Distribuée	Utilisations des modèles locaux (pas besoin d'un modèle global)	Besoin d'un protocole de communication

TABLE 2.1 – Comparaison des méthodes de diagnostic des SED

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous sommes intéressés au problème de diagnostic des SED modélisés par des RdP. Dans un premier temps, nous avons présenté quelques définitions et terminologies utilisées dans le domaine de diagnostic pour illustrer cette problématique et positionner notre travail. Nous faisons par la suite un état de l'art du problème général de diagnostic des SED qui peuvent être modélisés de plusieurs façons. L'état de l'art de ce chapitre a montré que la problématique du diagnostic des systèmes modélisés par des RdP a été largement abordée au cours des dernières années. Nous avons présenté quelques méthodes de diagnostic pour les SED en général et pour les RdP en particulier et qui reposent sur un certain nombre de critères, à savoir l'outil de modélisation, le type de défauts et la structure de la prise de décision. Selon ces trois critères, une comparaison entre les différentes approches de diagnostic des SED a été présentée.

Chapitre 3

Synthèse d'observateur à entrées inconnues pour les RdPPO

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous traitons le problème de la synthèse d'un observateur pour RdPPO avec des entrées inconnues. Nous présentons d'abord les RdPPO d'une manière formelle. Ensuite, nous montrons que l'évolution du jeton dans un RdPPO est représentée par des équations d'états similaires à celles utilisées pour les systèmes descripteurs qui peuvent être considérés comme une généralisation des systèmes dynamiques linéaires. Par la suite, nous proposons une méthode de synthèse d'un observateur à des entrées inconnues capable de reconstruire les marquages de places et les séquences de franchissements. Finalement des simulations sous Matlab permettent de vérifier le bien-fondé de la méthode proposée.

3.2 Définitions et notations de base

Dans cette section, nous rappelons la définition d'un RdPPO, et nous montrons comment l'équation de marquage sous forme d'un système descripteurs.

3.2.1 Réseaux de Petri partiellement observables

En général, les capteurs dans un RdP peuvent être classés en deux grandes catégories [58] :

- Capteurs des places qui indiquent le nombre de jetons contenus dans une place.
- Capteurs des transitions qui peuvent détecter l'occurrence d'un événement.

Remarque 3. Le terme "état observable" classiquement utilisé pour les SED signifie que l'état est connu ou mesurable (appartient à l'ensemble des sorties), et non observable signifie inconnu (n'appartient pas à l'ensemble des sorties).

Définition 5. Un RdPPO Q peut être défini par un quadruplet $\{\mathcal{R}, P_o, T_o, M_0\}$ tel que :

- \mathcal{R} est un RdP généralisé avec n places et m transitions.
- $P_o \subseteq P$ est l'ensemble de n_1 places observables avec $0 \leq n_1 \leq n$.
- $T_o \subseteq T$ est l'ensemble de m_1 transitions observables avec $0 \leq m_1 \leq m$.
- M_0 est le marquage initial.
- $Pré : P \times T \rightarrow 0, 1$ est l'application d'incidence avant.
- $Post : P \times T \rightarrow 0, 1$ est l'application d'incidence arrière.

La fonction $W = Post - Pré$ est appelée matrice d'incidence.

$P_o \subseteq P$ est l'ensemble de n_1 places observables et $T_o \subseteq T$ est l'ensemble de m_1 transitions observables. On peut toujours renommer les places et les transitions pour s'assurer que les n_1 premières places sont observables et les m_1 premières transitions sont observables.

Une place observable $p \in P_o = P \setminus P_{uo}$ est équipée d'un capteur qui permet de compter le nombre de ses jetons. De la même manière, une transition observable $t \in T_o = T \setminus T_{uo}$ est équipée d'un capteur qui indique quand une transition t est franchie.

3.2.2 Représentation d'état d'un RdPPO

Définition 6. [4] Considérons un RdPPO Q . La séquence $\{M_k, \sigma_{k+1}\}$ est dite séquence admissible de marquage et de transitions de Q , si pour tout $k \in \mathbb{N}$, $M_k \in \mathbb{N}^n$ et $\sigma_{k+1} \in \{0, 1\}^m$, la condition suivante est vérifiée [4] :

$$M_{k+1} = M_k + W\sigma_{k+1}, \quad (3.1)$$

où $M_k \in \mathbb{N}^n$ est le vecteur de marquage des places et $\sigma_k \in \{0, 1\}^m$ le vecteur de franchissement des transitions à l'étape d'évolution k (itération). W est la matrice d'incidence où les lignes représentent les places et les colonnes représentent les transitions.

Nous pouvons ainsi considérer l'ensemble des marquages des places observables et des transitions observables comme les sorties du RdP accessibles à la mesure. Le vecteur de marquage et le vecteur de transitions sont arrangés de la manière suivante :

$$M_k = \begin{bmatrix} M_k^1 \\ M_k^2 \end{bmatrix} \text{ et } \sigma_k = \begin{bmatrix} \sigma_k^1 \\ \sigma_k^2 \end{bmatrix}, \quad (3.2)$$

où $M_k^1 \in \mathbb{N}^{n_1}$, $M_k^2 \in \mathbb{N}^{n_2}$ sont respectivement le marquage des places observables et le marquage des places non observables. $\sigma_k^1 \in \mathbb{N}^{m_1}$, $\sigma_k^2 \in \mathbb{N}^{m_2}$ sont respectivement le vecteur de transitions observables, et le vecteur de transi-

tions non observables, avec $n = n_1 + n_2$, et $m = m_1 + m_2$.

Il est bien remarquable que l'équation du marquage (3.1) d'un RdP est similaire de celle utilisée pour les systèmes linéaires de la forme :

$$\begin{cases} x_{k+1} = Ax_k + Bu_k \\ y_k = Cx_k \end{cases} . \quad (3.3)$$

Donc, on peut utiliser les techniques d'observation de ce système afin de résoudre le problème d'observation pour le système (3.1). Si on réécrit le système (3.1) avec l'équation de sortie, on obtient :

$$\begin{cases} M_{k+1} = M_k + W\sigma_{k+1} \\ \bar{y}_k = \bar{C}M_k = M_k^1 \end{cases} , \quad (3.4)$$

avec \bar{y} représente les places observables et la matrice \bar{C} donnée comme suit :

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} I_{n_1} & 0_{n_1 \times n_2} \\ 0_{n_2 \times n_1} & 0_{n_2 \times n_2} \end{bmatrix} .$$

Maintenant, si on applique la condition nécessaire et suffisante d'observabilité sur le système (3.4), on trouve :

$$\text{rang} \begin{bmatrix} \bar{C} \\ \bar{C}I \\ \vdots \\ \bar{C}I^{n-1} \end{bmatrix} = \text{rang}[\bar{C}] = n_1. \quad (3.5)$$

La condition d'observabilité du système (3.4) ne porte que sur \bar{C} , ce qui implique que pour être observable, l'état d'un tel système doit être entièrement mesuré c'est à dire $n_1 = n$.

Dans le cas où $n_1 < n$, le système (3.4) n'est pas observable et les informations fournies par les places observables ne sont pas suffisantes pour connaître le vecteur de marquage complet M_k . Cependant, on peut renforcer la sortie du système (3.4) par les informations des transitions observables en considérant que l'état du système est constitué du vecteur de marquage M_k et du vecteur de transitions σ_k . Dans ce cas, on obtient un système singulier que l'on appelle aussi un système descripteur ou système généralisé.

Maintenant, nous décomposons la matrice d'incidence comme :

$$W = [W_1 | W_2] = \left[\begin{array}{c|c} W_{11} & W_{12} \\ \hline W_{21} & W_{22} \end{array} \right],$$

avec $W_{11} \in \mathbb{R}^{n_1 \times m_1}$, $W_{12} \in \mathbb{R}^{n_1 \times m_2}$, $W_{21} \in \mathbb{R}^{n_2 \times m_1}$, et $W_{22} \in \mathbb{R}^{n_2 \times m_2}$.

Après la décomposition de W , le système (3.1) devient :

$$M_{k+1} = M_k + W_1\sigma_{k+1}^1 + W_2\sigma_{k+1}^2. \quad (3.6)$$

L'idée proposée est d'écrire l'équation du système (3.1) sous forme d'un système généralisé (descripteur ou singulier). Nous pouvons considérer les places observable et les transitions observable comme les sorties du système accessibles à la mesure. Nous noterons y la sortie du RdP. En utilisant les équations (3.2) et (3.6), on obtient :

$$\begin{bmatrix} I_n & -W_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_{k+1} \\ \sigma_{k+1}^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_n & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_k \\ \sigma_k^1 \end{bmatrix} + W_2 \sigma_{k+1}^2, \quad (3.7)$$

la sortie du RdPPO reste la même pour ce modèle et donc, l'équation d'état et de sortie sont données par :

$$\begin{cases} \mathcal{E} \Gamma_{k+1}^2 = \mathcal{A} \Gamma_k^2 + W_2 \sigma_{k+1}^2 \\ y_k = \mathcal{C} \Gamma_k^2 \end{cases}, \quad (3.8)$$

avec Γ_k^2 est le vecteur d'état généralisé :

$$\Gamma_k^2 = \begin{bmatrix} M_k \\ \sigma_k^1 \end{bmatrix} \in \mathbb{N}^{n+m_1}.$$

Les matrices \mathcal{E} , \mathcal{A} et \mathcal{C} sont définies comme :

$$\mathcal{E} = \begin{bmatrix} I_n & -W_1 \end{bmatrix}, \mathcal{A} = \begin{bmatrix} I_n & 0_{n \times m_1} \end{bmatrix}, \mathcal{C} = \begin{bmatrix} I_{n_1} & 0_{n_1 \times n_2} & 0_{n_1 \times m_1} \\ 0_{m_1 \times n_1} & 0_{m_1 \times n_2} & I_{m_1} \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

En supposant que σ_k^2 (transition non observable) comme une entrée inconnue, nous verrons par la suite, comment utiliser le système descripteur (3.10) pour synthétiser un observateur capable de reconstruire n_2 places non observables et m_2 transition non observables.

3.2.3 Rappel sur les systèmes descripteurs

Les systèmes descripteur ou systèmes singuliers peuvent être considérés comme une généralisation des systèmes dynamiques linéaires usuels. En effet, si les systèmes usuels font apparaître exclusivement des relations dynamiques, les systèmes singuliers comportent également des relations algébriques. Cette augmentation permet d'intégrer des relations statiques dans la modélisation, de conserver aux variables d'état leur signification physique, ainsi que de modéliser des processus présentant des comportements impulsifs et plus généralement non causaux.

Un système descripteur en temps discret peut être décrit sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \bar{E}x_{k+1} = \bar{A}x_k + \bar{B}u_k \\ y_k = \bar{C}x_k \end{cases}, \quad (3.10)$$

où $x_k \in \mathbb{R}^\alpha$, $u_k \in \mathbb{R}^\gamma$, $y_k \in \mathbb{R}^\delta$ sont respectivement le vecteur d'état, l'entrée et la sortie du système (3.10) à l'instant k . $\bar{E}, \bar{A} \in \mathbb{R}^{\beta \times \alpha}$ avec $\text{rank } \bar{E} < \alpha$, \bar{B} et \bar{C} sont des matrices réelles, constantes et de dimensions compatibles avec les dimensions de x_k, u_k et y_k .

Notons que la matrice \bar{E} n'a pas nécessairement une structure diagonale ((\bar{E}) est singulière) car les dérivées de plusieurs variables d'état peuvent intervenir dans une même relation ($\det(\bar{E}) = 0$) si la matrice \bar{E} est une matrice carrée).

Généralement l'observabilité des systèmes descripteurs est inspirée de la théorie de système linéaire et peut être formellement proposée comme suit :

Définition 7. [16] *Le système (3.10) est dit observable, si la condition initiale x_0 peut être déterminée de manière unique à partir de l'entrée u_k et la sortie y_k , pour tout $k \geq 0$.*

Cette définition de l'observabilité est générale et correspond à celle des systèmes standards. Une autre notion d'observabilité appelée observabilité causale a été présentée dans [16] pour les systèmes descripteurs en temps discret et dans [39] pour les systèmes descripteurs en temps continu. Pour définir cette observabilité, une discussion sur la notion de causalité est nécessaire.

Définition 8. [16, 39] *Le système (3.10) est dit causal, si l'état du système x_k ($0 < k$) peut être déterminé complètement à partir de la condition initiale x_0 , l'entrée u_k et la sortie y_k , pour tout $k \geq 0$.*

Le théorème suivant donne la condition de causalité :

Théorème 1. [39] *Le système (3.10) est causal si :*

$$\text{rang} \begin{bmatrix} \bar{E} & \bar{A} \\ 0 & \bar{E} \end{bmatrix} = \text{normal-rang}(\lambda \bar{E} - \bar{A}) + \text{rang} \bar{E}.$$

Le rang normal d'une matrice est défini comme son rang maximal.

Il faut bien noter que, la condition de test de la matrice de causalité des systèmes descripteurs en temps continu est valable pour les systèmes descripteurs en temps discret [39].

Maintenant, on peut définir l'observabilité causale comme suit :

Définition 9. [16, 39] *Le système (3.10) est dit causal observable (Y -observable), si l'état du système x_k ($0 < k$) peut être déterminé de manière unique à partir de la condition initiale x_0 , l'entrée u_k et la sortie y_k , pour tout $k \geq 0$ (Y vient de la première lettre du mot chinois pour le terme "causalité").*

Le théorème suivant résume les résultats obtenus dans [16, 39, 44].

Théorème 2. [16, 39, 44]

1. *Le système (3.10) est causal observable ssi :*

$$\text{rang} \begin{bmatrix} \bar{E} & \bar{A} \\ 0 & \bar{E} \\ 0 & \bar{C} \end{bmatrix} = \alpha + \text{rang} \bar{E} \text{ ou } \text{rang} \begin{bmatrix} \bar{E} \\ \bar{C} \end{bmatrix} = \alpha.$$

2. *Le système (3.10) est observable ssi il est causal observable et :*

$$\text{rang} \begin{bmatrix} \lambda \bar{E} - \bar{A} \\ \bar{C} \end{bmatrix} = \alpha, \forall \lambda \in \mathbb{C}, |\lambda| \geq 1.$$

Avec α est la dimension du vecteur d'état x_k .

3.3 Synthèse d'un observateur à entrée inconnue

Le principe fondamental d'observateur à entrée inconnue repose sur l'injection d'un signal dépendant des informations mesurables, notamment les sorties afin de faire converger l'erreur d'estimation vers zéro selon une dynamique désirée.

Le problème de la synthèse d'observateurs pour les systèmes descripteurs avec des entrées inconnues a reçu une attention considérable dans les dernières années, car il existe des situations où une partie des entrées ou perturbations sont inaccessibles.

Notre objectif est de concevoir un observateur à entrée inconnue pour les RdPPO en utilisant des méthodes traditionnelles pour les systèmes descripteur pour nous assurer que l'état actuel (places et transitions) sera exactement reconstruit à un instant donné.

3.3.1 Marquages et estimation des transitions

Dans cette section, nous rappelons les notions d'observabilité causale et d'observabilité pour les RdPPO, et nous proposons un observateur des RdPPO afin d'estimer à la fois les marquages et les transitions.

L'observabilité causale de RdPPO est définie comme la capacité à déterminer de façon unique le vecteur de marquage M_k et le vecteur de franchissement des transitions σ_k sur la base des sorties y_k et en supposant la connaissance de la marquage initiale M_0 , tandis que l'observabilité est définie comme la capacité à déterminer de façon unique le vecteur de marquage M_k et le vecteur de franchissement des transitions σ_k à partir des seules sorties y_k .

Théorème 3.

1. Le système descripteur (3.10) est causal et observable, si

$$\text{rank} \begin{bmatrix} \mathcal{E} & -W_2 \\ \mathcal{C} & 0 \end{bmatrix} = n + m \quad (3.11)$$

2. Le système descripteur (3.10) est causal observable, si 3.11 est maintenu, et :

$$\text{rank} \begin{bmatrix} \lambda \mathcal{E} - \mathcal{A} & -\lambda W_2 \\ \mathcal{C} & 0 \end{bmatrix} = n + m, \forall \lambda \in \mathbb{C} \quad (3.12)$$

3. Un RdPPO Q est causal observable si : $\text{rang } W_2 = m_2$.

4. Un RdPPO Q est observable si : $\text{rang } W_2 = m_2$ and $n = n_1$.

Supposons qu'un RdPPO tel que défini en (3.10) est causal observable, c'est-à-dire que la condition 1 du théorème 1 est valable. Par conséquent, nous pouvons maintenant définir l'observateur suivant :

$$\begin{cases} \Lambda_{k+1} = N\Lambda_k + Ly_k \\ \hat{\Gamma}_k = \Lambda_k + Hy_k \end{cases} \quad (3.13)$$

où $\Lambda_k \in \mathbb{N}^{n+m_1}$ est l'état de l'observateur, y_k est la sortie du système à l'instant k et N, L et H sont des matrices de dimensions appropriées à calculer. Le problème de la conception d'un observateur (3.13) pour le système (3.10) se réduit à trouver des matrices N, L et H telles que le vecteur global estimé $\hat{\Gamma}_k$ converge vers le vecteur de l'état Γ_k .

Lorsque l'observateur (3.13) est appliqué au système (3.8) l'erreur de l'estimation est définie comme :

$$\begin{aligned} e_k &= \Gamma_k - \hat{\Gamma}_k \\ &= \Gamma_k - \Lambda_k - HC_k \\ &= (I_s - HC)\Gamma_k - \Lambda_k. \end{aligned}$$

avec $s = n + m_1$

Soit $\mathcal{U} \in \mathbb{R}^{s \times n}$ une matrice réelle telle que :

$$\mathcal{U}\mathcal{E} = I_s - HC.$$

L'erreur d'estimation devient :

$$e_k = \mathcal{U}\mathcal{E}\Gamma_k - \Lambda_k. \quad (3.14)$$

A l'instant t_{k+1} , l'erreur d'estimation est :

$$\begin{aligned} e_{k+1} &= \mathcal{U}\mathcal{E}\Gamma_{k+1} - \Lambda_{k+1} \\ &= \mathcal{U}(\mathcal{A}\Gamma_k + W_2 \sigma_{k+1}^2) - N\Lambda_k - LC\Gamma_k \\ &= \mathcal{U}\mathcal{A}\Gamma_k - N(\mathcal{U}\mathcal{E}\Gamma_k - e_k) - LC\Gamma_k + \mathcal{U}W_2\sigma_{k+1}^2. \end{aligned}$$

Par conséquent, l'évolution de l'erreur d'estimation est décrite par :

$$e_{k+1} = Ne_k + (\mathcal{U}\mathcal{A} - N\mathcal{U}\mathcal{E} - LC)\Gamma_k + \mathcal{U}W_2\sigma_{k+1}^2. \quad (3.15)$$

L'erreur d'estimation converge vers zéro si les conditions suivantes sont satisfaites :

$$\mathcal{U}\mathcal{E} = I_s - HC, \quad (3.16)$$

$$N \text{ est stable}, \quad (3.17)$$

$$\mathcal{U}\mathcal{A} = N\mathcal{U}\mathcal{E} + LC, \quad (3.18)$$

$$\mathcal{U}W_2 = 0. \quad (3.19)$$

L'observateur est un système dynamique dont l'état est donné par Λ_k et son entrée est la sortie y_k de RdPPO. De l'état de l'observateur, nous dérivons $\hat{\Gamma}_k$ contenant les marquages estimés \hat{M}_k et les transitions observables $\hat{\sigma}_k^1$. Les matrices $\mathcal{U} \in \mathbb{R}^{sn}$ et $H \in \mathbb{R}^{(s(n_1+m_1))}$ sont définies comme suit :

$$[\mathcal{U} \ H] = [I_s \ 0_{s \times m_2}] \left[\begin{array}{cc} \mathcal{E} & W_2 \\ \mathcal{C} & 0 \end{array} \right]^+, \quad (3.20)$$

où la pseudo-inverse d'une matrice $()$ est définie comme $()^+ = ()^T \times (() \times ()^T)^{-1}$. Remplaçant (3.16) dans (3.18), nous obtenons :

$$\mathcal{U}\mathcal{A} = N(I - HC) + LC \Rightarrow N = \mathcal{U}\mathcal{A} - (L - NH)\mathcal{C}.$$

En posant :

$$K = L - NH. \quad (3.21)$$

On obtient :

$$N = \mathcal{U}\mathcal{A} - KC, \quad (3.22)$$

$$L = K + NH. \quad (3.23)$$

L'erreur d'estimation peut être réécrite en utilisant l'équation (3.15) et (3.22) sous la forme :

$$e_{k+1} = (\mathcal{U}\mathcal{A} - KC)e_k. \quad (3.24)$$

Nous choisissons la matrice $K \in \mathbb{R}^{(n+m_1) \times (n_1+m_1)}$ comme suit. Définir le sous-espace

$$\mathcal{V} = \ker \begin{bmatrix} 0_{n_2 \times n_1} & I_{n_2} & 0_{n_2 \times m_1} \end{bmatrix}. \quad (3.25)$$

Théorème 4. [4] *Le sous-espace \mathcal{V} est un sous-espace détectable intérieurement pour la paire $(\mathcal{C}, \mathcal{U}\mathcal{A})$. C'est-à-dire qu'il existe une matrice K telle que $(\mathcal{U}\mathcal{A} - KC)\mathcal{V} \subseteq \mathcal{V}$ et que la restriction $(\mathcal{U}\mathcal{A} - KC)|_{\mathcal{V}}$ de l'application linéaire $(\mathcal{U}\mathcal{A} - KC)$ sur \mathcal{V} est stable.*

Théorème 5. *Il existe un observateur (3.13) pour le système (3.8) si les conditions suivantes sont satisfaites :*

1. La paire $(\mathcal{U}\mathcal{A}, \mathcal{C})$ est détectable c'est à dire :

$$\text{rang} \begin{bmatrix} \lambda I_s - \mathcal{U}\mathcal{A} \\ \mathcal{C} \end{bmatrix} = s, \forall \lambda \in \mathbb{C}, |\lambda| \geq 1.$$

2. L'initialisation de l'observateur doit être donnée comme :

$$\Lambda_0 = \mathcal{U}\mathcal{E}\Gamma_0,$$

avec la matrice $\mathcal{U} \in \mathbb{R}^{s \times n}$ calculée à l'aide de l'équation (3.20).

Preuve 1. [4] La condition 1 du Théorème (5) a déjà été prouvée précédemment. Ci-après, nous allons montrer que la condition 2 est nécessaire lorsque l'erreur initiale appartient au sous-espace non observable.

La condition 1 du théorème (5) implique que $\forall \lambda \in \mathbb{C}, |\lambda| \geq 1$,

$$\text{rang} \begin{bmatrix} \lambda \mathcal{U}\mathcal{E} - \mathcal{U}\mathcal{A} + \lambda \mathcal{H}\mathcal{C} \\ \mathcal{C} \end{bmatrix} = s,$$

il existe une matrice $\begin{bmatrix} \mathcal{U} & \mathcal{H} \end{bmatrix}$ de rang complet telle que :

$$= \text{rang} \left(\begin{bmatrix} \mathcal{U} & \mathcal{H} & 0 \\ 0 & 0 & I_\mu \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda \mathcal{E} - \mathcal{A} \\ \lambda \mathcal{C} \\ \mathcal{C} \end{bmatrix} \right),$$

avec $\mu = n_1 + m_1$

$$= \text{rang} \begin{bmatrix} \lambda \mathcal{E} - \mathcal{A} \\ \mathcal{C} \end{bmatrix}.$$

En utilisant l'équation (3.9), on obtient :

$$= \text{rang} \begin{bmatrix} \lambda I_{n_1} - I_{n_1} & 0 & -\lambda W_{11} \\ 0 & \lambda I_{n_2} - I_{n_2} & -\lambda W_{12} \\ I_{n_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{m_1} \end{bmatrix},$$

$$= n_1 + \text{rang} \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda I_{n_2} - I_{n_2} \\ 0 \end{bmatrix} + m_1.$$

Alors, pour $\lambda = 1$ le rang de la matrice $\begin{bmatrix} \lambda I_s - \mathcal{U}\mathcal{A} \\ \mathcal{C} \end{bmatrix}$ est inférieur à $(n + m_1)$ ce qui signifie que la paire $(\mathcal{U}\mathcal{A}, \mathcal{C})$ n'est pas complètement observable. Le sous-espace non observable est engendré par $\begin{bmatrix} 0 & I_{n_2} & 0 \end{bmatrix}^T$ et correspond à la valeur propre $\lambda = 1$. Ainsi, pour éviter l'instabilité de l'observateur, l'erreur d'estimation doit être nulle à l'instant initial. Ainsi, l'erreur initiale doit vérifier $e_0 = \mathcal{U}\mathcal{E}\Gamma_0 - \Lambda_0 = 0 \Rightarrow \Lambda_0 = \mathcal{U}\mathcal{E}\Gamma_0$.

3.3.2 Estimation de la séquence de franchissement

Nous avons vu dans le paragraphe précédent, comment estimer le vecteur de marquage des places du RdPPO. Maintenant, nous nous intéressons au problème de l'estimation de la séquence de franchissement. Ce problème revient à déterminer le vecteur de transitions σ_k composé d'un ensemble de transitions observables σ_k^1 et un ensemble de transitions non observables σ_k^2 . Par conséquent, les transitions non observables σ_k^2 sont calculées dans le théorème suivant :

Théorème 6. Les transitions non observables σ_k^2 sont calculées par l'équation suivante :

$$\sigma_{k+1}^2 = W_2^+ \mathcal{E} \hat{\Gamma}_{k+1} - W_2^+ \mathcal{A} \hat{\Gamma}_k. \quad (3.26)$$

Preuve 2. Sous l'hypothèse que le système (3.8) est causal observable c'est à dire $\text{rang}[W_2] = m_2$, on peut donc estimer les transitions non observables de l'équation (3.8) par l'équation (3.26).

3.4 Exemple de Simulation

Dans cette section, nous allons présenter quelques résultats de simulation afin d'illustrer l'efficacité de l'approche proposée.

3.4.1 Exemple 1

Dans cet exemple, quelques résultats de simulation seront présentés pour un simple système de production afin de démontrer l'efficacité de l'approche proposée. Le système étudié est représenté sur la figure (3.1), il présente un fonctionnement d'un stock à capacité 3 entre deux machines identiques MCH1 et MCH2. La machine MCH1 dépose les pièces dans le stock, s'il y a un espace disponible, et la machine MCH2 déplace les pièces si le stock n'a pas un espace vide.



FIGURE 3.1 – Le système de production

Le modèle RdP correspondant au système de production étudié est représenté sur la figure (3.1), avec des jetons en p_1, p_3 et p_6 .

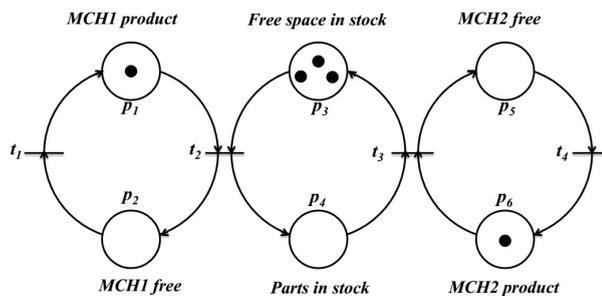


FIGURE 3.2 – Le modèle RdP du système de production

Dans cet exemple, nous supposons que les places p_1, p_2, p_5 et p_6 et les transitions t_1, t_4 qui représentent les machines MCH1 et MCH2 sont connues (observables). Les places p_3 et p_4 qui représentent respectivement l'état du stock et le nombre de pièces en stock sont supposées inconnues (non observables).

Par conséquent, le rôle de l'observateur proposé consiste à estimer le nombre de pièces dans le stock (en estimant le marquage des places p_3 et p_4), ainsi que les instants de franchissement des transitions (t_2 et t_3) qui correspondent respectivement aux événements de dépôt et de retrait c'est à dire ($n_1 = 4, n_2 = 2, m_1 = 2$ et $m_2 = 2$).

La matrice d'incidence W et le vecteur de marquage initial M_0 associés au modèle du RdP présenté dans la figure (3.2) sont donnés par :

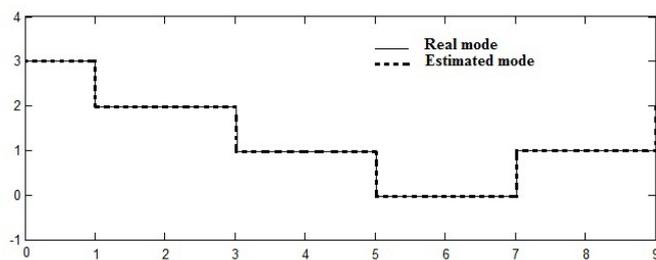


FIGURE 3.4 – Le mode réel et le mode estimé de p_4

3.5 Conclusion

Ce chapitre est consacré pour la synthèse d'observateurs à entrées inconnues pour les SED modélisé par RdPPO. D'abord, nous avons donné une vue générale sur les RdPPO ainsi que les notions de bases. Ensuite, nous avons également synthétisé un observateur qui permet de résoudre à la fois le problème d'estimation du marquage des places et le problème de la reconstitution de la séquence de franchissement de transitions. Une condition nécessaire de l'observateur proposé est la connaissance du marquage initial. L'efficacité de l'approche proposée est illustrée par des exemples.

Chapitre 4

Diagnostic de systèmes décrits par des réseaux de Petri partiellement observable

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous traitons le problème du diagnostic des défauts pour les SED modélisé par les RdPPO. Le RdP est utilisé afin de représenter le fonctionnement normal ainsi que le fonctionnement anormal du système étudié. Notre objectif est de détecter et d'identifier les défauts qui peuvent s'être produits dans les transitions et les places en supposant la connaissance du marquage de quelques places et le franchissement de certaines transitions. Pour cela, nous appliquons des algorithmes pour détecter et identifier ces défauts basés sur la comparaison des transitions et des marquages estimés du système anormal fournie par l'observateur algébrique avec ceux du système normal. L'efficacité de l'approche proposée est illustrée par des exemples.

4.2 Formulation du problème

Dans cette section, nous formulons le problème du diagnostic pour les RdPPO. Notre objectif est de détecter et d'identifier les défauts qui ont pu se produire à la fois dans les places et les transitions. Deux types de défauts sont considérés :

4.2.1 Défauts des places

Un défaut de place est un défaut qui provoque un changement du nombre de jetons dans une seule place du RdPPO, c'est-à-dire que lorsqu'un défaut se produit dans la place p , le nombre de jetons dans p augmente ou diminue d'un nombre entier. On suppose que des défauts de place se produisent dans les places non observables et/ou observables, c'est-à-dire que des défauts peuvent se produire au niveau des capteurs et/ou dans le matériel interne du système. Le marquage erroné à l'instant k peut être exprimé comme suit :

$$M_k^f = M_k + f_{p_i} \quad (4.1)$$

Où : M_k représente le marquage dans les conditions normales et f_{p_i} représente le vecteur défaut de place.

Si la $i^{\text{ème}}$ entrée de f_{p_i} est négative, alors $M(p_i)$ diminue et si elle est positive, cela signifie que $M(p_i)$ augmente.

4.2.2 Défauts des transitions

Un défaut de transition est généré lorsque le nombre de jetons n'est pas correctement mis à jour à la place d'entrée ou de sortie correspondante après le franchissement de cette transition. Une transition est dite à défaut **post-condition** si ses places d'entrée perdent des jetons mais qu'aucun jeton n'est déposé à ses places de sortie. De la même façon, une transition est dite à défaut **pré-condition**, si les jetons ne sont pas retirés de ses places d'entrée. Un défaut de transition se produit avec un défaut post-condition (défaut pré-condition) si la $j^{\text{ème}}$ colonne de la post-matrice incidence du système défectueux est nulle, c'est-à-dire $post_f(:, t_j) = 0$ ($pré_f(:, t_j) = 0$). On peut considérer la matrice d'incidence du système anormal comme :

$$W_f(p_i, t_j) = Post_f(p_i, t_j) - Pré_f(p_i, t_j) \quad (4.2)$$

L'apparition d'un défaut dans une transition t affecte les nombres de jetons dans ses places d'entrée (sortie) et il apparaît dans la colonne correspondante $W_f(:, t_j)$ de sorte que pour chaque $j = 1, \dots, m$:

- Si $W_f(:, t_j) > 0$ (avec $W(:, t_j) \in \mathbb{Z}_+^n$ est un vecteur de colonne dont les entrées sont des entiers positifs ou nuls), alors t_j se franchie avec un défaut de pré-condition.
- Si $W_f(:, t_j) < 0$ (avec $W(:, t_j) \in \mathbb{Z}_-^n$ est un vecteur de colonne dont les entrées sont des entiers nuls ou négatifs.), alors t_j se franchie avec un défaut post-condition.

Notons que, comme dans [9], nous supposons que nous connaissons la structure nette du système anormal et du système normal. Dans ce but, nous considérons le système normal donné en (3.8) et nous définissons le système anormal comme suit :

$$\begin{cases} \mathcal{E}^f \Gamma_{k+1}^f = \mathcal{A} \Gamma_k^f + W_2^f \sigma_{k+1}^{2f} \\ y_k^f = \mathcal{C} \Gamma_k^f \end{cases} \quad (4.3)$$

avec $\Gamma_k^f = \begin{bmatrix} M_k^{fT} & \sigma_k^{1fT} \end{bmatrix}^T \in \mathbb{N}^{n+m_1}$.

Un schéma de diagnostic de défaut est représenté sur la figure (4.1), qui représente deux étapes principales, la première est l'estimation des places et des transitions et la deuxième est la détection et l'identification des défauts. L'approche proposée est fondée sur la comparaison des places et transitions estimées du système anormal (système réel) avec ceux du système normal (modèle) et utilisé les résultats de comparaison (résidus) par des algorithmes pour diagnostiquer l'apparition de toute

défaut.

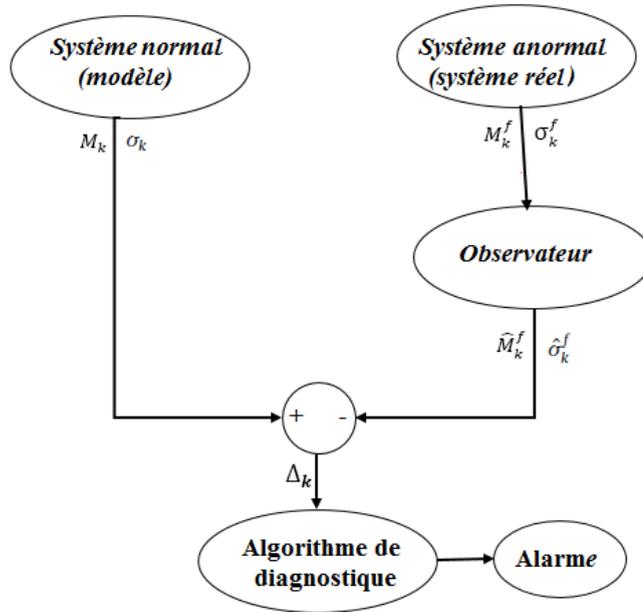


FIGURE 4.1 – Schéma fonctionnel de diagnostic des défauts d'un RdPPO

4.3 Diagnostic des défauts

Maintenant, nous nous concentrons sur le diagnostic des défauts qui sont modélisés comme des défauts survenant sur des transitions et/ou des places dans RdPPO. Notre objectif est de détecter et d'identifier les défauts qui peuvent s'être produits dans un RdPPO en se basant sur le vecteur estimé du système anormal $\hat{\Pi}_k^f$ fourni par l'observateur (4.3) et la connaissance du comportement normal du RdPPO. Finalement, on définit le critère de Δ_k comme suit :

$$\Delta_k = \Pi_k - \hat{\Pi}_k^f = \begin{bmatrix} \Gamma_k \\ \sigma_k^2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{\Gamma}_k^f \\ \hat{\sigma}_k^{2f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta M_k \\ \Delta \sigma_k \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Le vecteur Δ_k formé à partir de la différence entre le vecteur d'état généralisé du système normal Π_k (composé à partir de vecteur de marquage M_k et vecteur de tir σ_k) et vecteur d'état généralisé estimé du système anormal $\hat{\Pi}_k^f$.

4.3.1 Diagnostic de défaut de transition

Nous abordons dans cette section le problème de diagnostic de fautes dans le cas où seulement des défauts de transition se produisent (pas de place défaut). L'apparition de défauts de transition affecte le nombre de jetons dans les places d'entrée

(sortie) d'une transition particulière dans un RdPPO. Nous considérons, que les défauts de transition se produisent sur les transitions observables et les transitions non observables et une transition peuvent souffrir de défauts post-condition ou pré-condition mais pas les deux (les effets seront annulés si des défauts post-condition et pré-condition se produisent à une place en même temps et le système peut fonctionner comme si aucune défaut ne s'était produite).

Proposition 1. *Soit $\{\Gamma_k, y_k\}$ est la solution de (3.8), et soit $k \in \mathbb{N}$, $\{\hat{\Pi}_k^f, \hat{\Gamma}_k^f, \hat{\sigma}_k^f\}$ satisfait (3.13).pour chaque $k \in \mathbb{N}$ défini dans (4.4) , le RdPPO est un défaut de transition diagnostiquable si $\Delta M_k \neq 0$.*

Preuve 3. *Comme mentionné précédemment, un défaut de transition affecte le nombre de jetons dans les places d'entrée/sortie. Alors, si la différence entre le marquage du système normal et l'estimation de marquage du système anormal est égal à zéro ($\Delta M_k = 0$), cela signifie qu'aucun changement n'a affecté les places et donc, aucune erreur de transition s'est produite. Or, si l'on fait $\Delta M_k \neq 0$, cela signifie qu'il y a un changement dans le nombre de jetons par places et donc, une erreur de transition s'est produite.*

Proposition 2. *Soit $\{\Gamma_k, y_k\}$ est la solution de (3.8), et soit $k \in \mathbb{N}$, $\{\hat{\Pi}_k^f, \hat{\Gamma}_k^f, \hat{\sigma}_k^f\}$ satisfait (3.13) pour chaque $k \in \mathbb{N}$. Alors la formule suivante tient :*

Pour $j = 1, \dots, m$:

- *Si $\Delta M_k > 0$ and $\hat{\sigma}_k^f(j) = 1$, alors t_j se franchie avec une post-condition défaut.*
- *Si $\Delta M_k < 0$ and $\hat{\sigma}_k^f(j) = 1$, alors t_j se franchie avec une pré-condition défaut.*
- *Si $\Delta M_k = 0$ and $\hat{\sigma}_k^f(j) = 1$, alors t_j se franchie sans défaut.*

Preuve 4. *D'après la proposition (1), $\Delta M_k \neq 0$ signifie qu'un défaut de transition s'est produit. Maintenant, $\Delta M_k > 0$ (dont les entrées sont soit zéro, soit des entiers non négatifs) signifie qu'une transition t_j (la $j^{\text{ième}}$ entrée de $\hat{\sigma}_k^f$) consomme des jetons à partir de ses places d'entrée mais aucun jetons ne sont déposés dans ses places de sortie. Donc, dans ce cas, t_j tire avec une faute post-conditionnelle. De la même manière, si $\Delta M_k < 0$, alors t_j ne retire pas de jetons de ses places d'entrée et donc, t_j se franchie avec une faute pré-conditionnelle.*

4.3.2 Diagnostic de défaut de places

Nous abordons dans cette section le problème de diagnostic de fautes où seules les fautes de place se produisent dans un RdPPO. L'apparition d'une faute de place à la place p entraîne une valeur incorrecte de $M(p)$ en augmentant ou en diminuant d'un nombre entier le nombre de jetons dans cette place. Nous considérons deux types de fautes de places : les fautes survenant sur des places observables et les fautes sur des places non observables.

Le premier type de fautes où les fautes se produisent sur des places observables peuvent être diagnostiquées à partir de ΔM_k . En d'autres termes, si $\Delta M_k \neq 0$, ceci

justifie la modification du nombre de jetons dans les places ce qui signifie l'apparition d'un défaut sur les places.

Dans le deuxième type où un défaut se produit sur des places inobservables, il peut influencer sur les caractéristiques dynamiques du système mais ne peut être diagnostiqué sur la base de la différence entre le marquage normal du système et le marquage estimé du défaut puisqu'il n'y a pas de capteurs à ces places.

Un défaut influence les caractéristiques dynamiques d'un système si son occurrence modifie le nombre de jetons dans la place correspondante et active ou désactive une transition (c'est-à-dire qu'une faute associée dans une place p active une transition t en augmentant le nombre de jetons en p , tandis qu'elle désactive t dans p en diminuant le nombre de jetons dans p).

Par conséquent, pour résoudre le problème du diagnostic des défauts des places, nous devons identifier le franchissement de toutes les transitions qui est faisable par notre observateur.

Proposition 3. *Soit $\{\Gamma_k, y_k\}$ est la solution de (3.8), et soit $\{\hat{\Pi}_k^f, \hat{\Gamma}_k^f, \hat{\sigma}_k^f\}$ satisfait (3.13) pour $k \in \mathbb{N}$, Soit Δ_k défini dans (4.4). le RdPPO est un défaut de place diagnostiquable si $\Delta_k \neq 0$.*

Preuve 5. *On considère deux cas : le premier lorsque $\Delta M_k \neq 0$ et $\Delta \sigma_k = 0$. Dans ce cas, on peut déduire qu'il y a un changement du nombre de jetons et donc, qu'une faute associée à une place observable s'est produite. Le deuxième cas où $\Delta M_k \neq 0$ et $\Delta \sigma_k \neq 0$, les fautes peuvent se produire à la fois sur les places observables et inobservables, il existe une transition qui est activée (ou désactivée) par une place de défaut et ceci est dû uniquement à l'apparition d'un défaut dans une place non observable.*

Les principales étapes pour diagnostiquer les défauts de place dans RdPPO en supposant qu'aucun défaut de transition ne se produit, sont résumées dans l'algorithme suivant :

Algorithme 1

Diagnostic des défauts des places

Soit Δ_k de (4.4)

Pour $i = 1, \dots, n$

Pour $j = 1, \dots, m$

Diagnostic des défauts des places (observables et inobservables).

A. Si $\Delta M_k(i) \neq 0 \wedge \Delta \sigma_k(j) \neq 0$ alors

Pour $l = 1, \dots, n$

1. Si $W(p_l, t_j) < 0 \wedge p_l \in P_{uo}$ alors

2. Si $W(p_i, t_j) = 0$ alors p_i et p_l sont des places défectueuses.

3. Sinon p_l est une place défectueuse.

4. Sinon il n'y a pas une place défectueuse.

Diagnostic des défauts des places (observables).

B. Si $\Delta M_k(i) \neq 0 \wedge \Delta \sigma_k(j) = 0$ alors p_i est une place défectueuse.

À partir de l'étape (A) de l'algorithme 1, nous pouvons détecter les fautes qui se produisent sur les place observables et non observables en utilisant la matrice d'incidence.

$W(p_l, t_j) < 0 \wedge p_l \in P_{uo}$ signifie que p_l est un place d'entrée de la transition activée (ou désactivée) t_j et donc que p_l est une place défectueuse. $W(p_i, t_j) = 0$ signifie que p_i n'est pas une place de sortie de t_j . Ainsi, la modification du nombre de jetons $\Delta M_k(i) \neq 0$ est due à l'apparition d'une faute dans p_l mais pas une conséquence de l'apparition d'une faute dans p_l . Dans l'étape (B), seules les fautes en place observables ont se sont produites.

4.3.3 Diagnostic des défauts de places et de transitions

Dans cette section, nous visons à détecter et identifier les fautes qui peuvent se produire sur les places et les transitions d'un RdPPO en même temps. L'apparition de fautes sur les places et les transitions affecte le nombre de jetons dans les places d'un RdPPO. L'approche proposée ici est basée sur la différence entre le vecteur d'état généralisé du système normal Π_k , et le vecteur d'état généralisé estimé du système anormal $\hat{\Pi}_k^f$. Rappelons qu'aucune transition ne subit à la fois une faute de pré-condition et de post-condition. Nous avons le résultat suivant :

Proposition 4. *Si le RdPPO est diagnostiquable par faute de place alors il est diagnostiquable pour les fautes de transition et de place.*

Cela signifie que, le problème de diagnostic des fautes de transition et de place peut être vu comme un problème de fautes de place puisque les fautes de transition peuvent être considérées comme une combinaison de plusieurs défauts de place. Par conséquent, la condition de la proposition 3 reste valide pour diagnostiquer les fautes associées à la fois aux transitions et aux places.

Proposition 5. *Soit $\{\Gamma_k, y_k\}$ est la solution de (3.8), et soit $\{\hat{\Pi}_k^f, \hat{\Gamma}_k^f, \hat{\sigma}_k^f\}$ satisfait (3.13) pour chaque $k \in \mathbb{N}$. Pour Δ_k défini dans (4.4), le RdPPO est un défaut de place et de transition diagnostiquable si $\Delta_k \neq 0$.*

Preuve 6. *Dans le cas où $\Delta M_k \neq 0$ et $\Delta \sigma_k = 0$, on peut déduire qu'une faute de transition et/ou de places (places observables) se sont produites car il y a un changement uniquement dans le nombre de jetons.*

Dans le second cas, $\Delta M_k \neq 0$ et $\Delta \sigma_k \neq 0$, ce qui signifie qu'une faute de transition ou/et une faute de place (observables et inobservables) ont eu lieu car il y a un changement dans le nombre de jetons et il existe une transition qui a été activée (ou désactivée) dans le système anormal.

L'algorithme suivant montre comment diagnostiquer les fautes dans RdPPO dans le cas où le système souffre à la fois de défauts de place et de transition.

Algorithme 2

Diagnostic des défauts de place et de transition

Soit Δ_k de (4.4)

Pour $i = 1, \dots, n$

Pour $j = 1, \dots, m$

Diagnostic des défauts des transitions ou/et des défauts des places (observables et inobservables)

A. Si $\Delta M_k(i) \neq 0 \wedge \Delta \sigma_k(j) \neq 0$ alors

Pour $l = 1, \dots, n_2$

1. Si $W_f(p_l, t_j) < 0 \wedge p_l \in P_{uo}$ alors

2. Si $W_f(p_i, t_j) = 0$ alors

Pour $q = 1, \dots, m$

3. If $\hat{\sigma}_k^f(q) = 1 \wedge q \neq j$ alors

4. Si $W_f(:, t_q) < 0 (> 0)$ alors

5. Si $W(p_i, t_q) = 0$ alors

p_i, p_l sont des places défectueuses et t_q est une transition défectueuse.

6. sinon p_l est une place défectueuse et t_q

est une transition défectueuse.

7. sinon p_i et p_l sont des places défectueuses.

8. sinon Si $\hat{\sigma}_k^f(q) = 1 \wedge q \neq j$ alors

9. Si $W_f(:, t_q) < 0 (> 0)$ alors

10. If $W(p_i, t_q) = 0$ alors

p_i, p_l sont des places défectueuses et t_q est une transition défectueuse.

11. sinon p_l est une place défectueuse et t_q

est une transition défectueuse.

12. sinon p_l est une place défectueuse.

Diagnostic des défauts des transitions ou/et des défauts des places (observables)

B. Si $\Delta M_k(i) \neq 0 \wedge \Delta \sigma_k(j) = 0$ alors

13. Si $\hat{\sigma}_k^f(j) = 1 \wedge W_f(:, t_j) < 0 (> 0)$ alors

14. Si $W(p_i, t_j) = 0$ alors

p_i est une place défectueuse et t_j est une transition défectueuse.

15. sinon t_j est une transition défectueuse.

16. sinon p_i est une place défectueuse.

L'algorithme 2 est basé sur deux étapes principales (A) et (B).

- A partir de l'étape (A), nous pouvons diagnostiquer les défauts qui se produisent à la fois sur les transitions et les places (inobservables et observables) en fonction de Δ_k et de la matrice d'incidence du système anormal W_f avec $W_f(:, t_q) > 0 (< 0)$ est un vecteur colonne dont les entrées sont soit zéro soit des entiers positifs (négatifs).

— A partir de l'étape (B), nous pouvons diagnostiquer les fautes qui se produisent sur les transitions et/ou places observables. Cet algorithme peut être pleinement compris grâce à des exemples donnés dans la section de résultats de la simulation.

4.4 Résultats de simulations

Dans cette section, nous considérons deux exemples, le premier est un exemple académique et le second représente un système de fabrication pris de [36] pour illustrer l'approche proposée.

Exemple 1 :

Considérons un RdPPO représenté sur la figure (4.2) avec $M_0 = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$. Nous supposons que p_2, p_3 and p_4 sont des places non observables et que t_1 and t_5 sont des transitions non observables (i.e., $n_1 = 2, m_1 = 3, n_2 = 3$ et $m_2 = 2$).

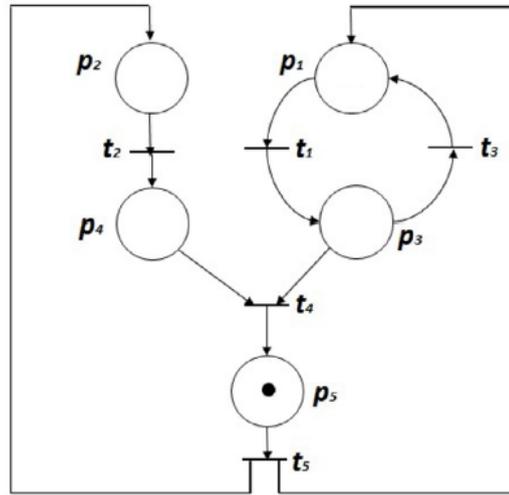


FIGURE 4.2 – Modèle de RdP.

1. Pour tester l'algorithme 1, considérons que la séquence de franchissement appliquée du système normal est $t_5 t_1 t_2 t_4$ et supposons qu'après le franchissement de t_2 , la place inobservable p_2 augmente le nombre de jetons d'un (sans le franchissement de t_5) ce qui permet de franchir la transition t_2 (c'est-à-dire que t_2 est tirée en même temps avec t_4).

La matrice d'incidence associée au système est donnée par :

$$W = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\text{rang} \begin{bmatrix} \mathcal{E}_f & -W_2 \\ \mathcal{C}_f & 0 \end{bmatrix} = 10$$

Donc, le RdPPO étudié est causal observable, et que nous devons donc trouver les matrices U, H et K pour concevoir l'observateur (3.13).

Les matrices U et H peuvent être calculées à partir de (3.20) et la matrice K est choisie de telle sorte que les valeurs propres de l'observateur sont à l'intérieur du cercle unité (choisi de façon que $(U\mathcal{A} - K\mathcal{C})$ soit stable). Ensuite, le vecteur complet des états $\hat{\Pi}_k$ fourni par l'observateur (3.13), est donné comme suit :

$$\hat{\Pi}_k = \begin{bmatrix} \hat{p}_1 \\ \hat{p}_2 \\ \hat{p}_3 \\ \hat{p}_4 \\ \hat{p}_5 \\ \hat{t}_1 \\ \hat{t}_2 \\ \hat{t}_3 \\ \hat{t}_4 \\ \hat{t}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k=0 & k=1 & k=2 & k=3 & k=4 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Maintenant, nous calculons le vecteur Δ_k à partir de (4.4), nous obtenons :

$$\Delta M_k = \begin{bmatrix} k=0 & k=1 & k=2 & k=3 & k=4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \Delta \sigma_k = \begin{bmatrix} k=0 & k=1 & k=2 & k=3 & k=4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

À partir $\Delta M_k(i)$, $\Delta \sigma_k(j)$ et de l'algorithme 1, nous pouvons facilement diagnostiquer les défauts de notre système. Nous pouvons voir qu'il n'y a pas de défauts dans les trois premières instants (c'est-à-dire pour $k = 0, 1, 2, 3$). Pour $k = 4$, on peut remarquer que $\Delta M_4(i) \neq 0$ for $i = 4$ et $\Delta \sigma_4(j) \neq 0$ for $j = 2$.

En suivant l'algorithme 1, nous pouvons détecter l'occurrence de défauts en utilisant les étapes suivantes :

A partir de l'étape (A), pour $i = 4$ et $j = 2$ (i et j sont déduits de $\Delta M_4(i)$ and $\Delta \sigma_4(j)$). On continue vers l'étape (1) pour $l = 2$ et $j = 2$ (l est déduit de W et représente la place d'entrée de t_j). Puisque la condition de l'étape (2) n'est pas vérifiée, nous concluons à partir de l'étape (3) qu'un défaut se produit à la place p_l ($l = 2$) à l'instant $k = 4$.

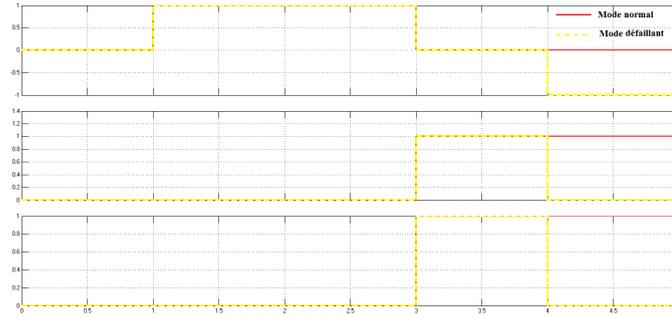


FIGURE 4.3 – Mode normal et mode défaillant de p_2 , p_4 et t_2 respectivement.

Exemple 2 :

Considérons un système de fabrication de [36] composé de trois robots et de trois machines. Le RdP correspondant de ce système est représenté sur la figure (4.4).

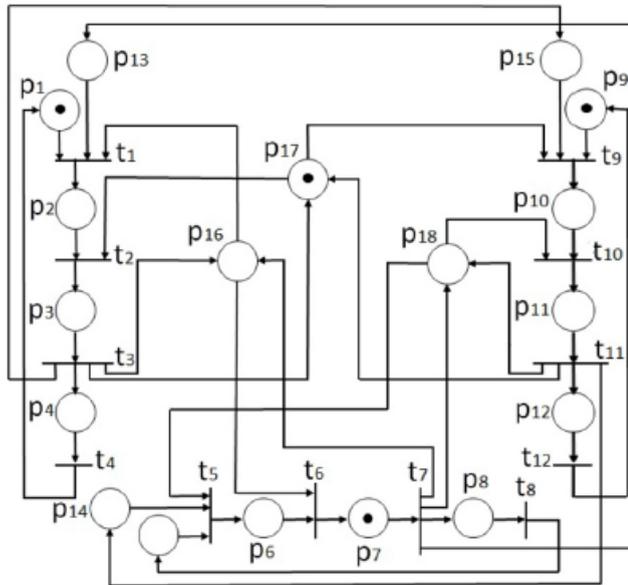


FIGURE 4.4 – Modèle de réseau de Pétri d'un système de fabrication.

Dans ce système, nous supposons que les places $P_o = \{p_3, p_7, p_{11}, p_{16}, p_{17}, p_{18}\}$ sont observables, et les transitions $T_o = \{t_1, t_4, t_5, t_8, t_9, t_{12}\}$ sont observables (i.e. $n_1 = 6, n_2 = 12, m_1 = 6$ et $m_2 = 6$). Supposons que la séquence de tir est $t_7 t_1 t_2 t_3 t_9$ et considérons que trois défauts se produisent ; un défaut de place se produit dans p_{11} en augmentant le nombre de jetons d'un à l'instant $k = 4$ et deux défauts se produisent en même temps pour $k = 5$; t_9 se produit avec un défaut post-condition et p_{12} augmente le nombre de jetons d'un qui conduit à permettre une transition t_{12} (c'est-à-dire que t_9 est concurrente de t_{12}). A cet effet, la matrice d'incidence associée au système défaillant est donnée par :

$$W_f = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

En utilisant notre approche algébrique pour décider de l'observabilité en se basant sur le test du rang d'une matrice, on obtient :

$$\text{rang} \begin{bmatrix} \mathcal{E}_f & -W_2^f \\ \mathcal{C}_f & 0 \end{bmatrix} = 30$$

Donc, le RdPPO étudié est causal observable.

Ensuite, nous obtenons le vecteur complet des états $\hat{\Pi}_k^f$ comme suit :

$$\hat{\Pi}_k^f = \begin{bmatrix} \hat{p}_1 \\ \hat{p}_2 \\ \hat{p}_3 \\ \hat{p}_4 \\ \hat{p}_5 \\ \hat{p}_6 \\ \hat{p}_7 \\ \hat{p}_8 \\ \hat{p}_9 \\ \hat{p}_{10} \\ \hat{p}_{11} \\ \hat{p}_{12} \\ \hat{p}_{13} \\ \hat{p}_{14} \\ \hat{p}_{15} \\ \hat{p}_{16} \\ \hat{p}_{17} \\ \hat{p}_{18} \\ \hat{t}_1 \\ \hat{t}_2 \\ \hat{t}_3 \\ \hat{t}_4 \\ \hat{t}_5 \\ \hat{t}_6 \\ \hat{t}_7 \\ \hat{t}_8 \\ \hat{t}_9 \\ \hat{t}_{10} \\ \hat{t}_{11} \\ \hat{t}_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k=0 & k=1 & k=2 & k=3 & k=4 & k=5 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Maintenant, nous nous tournons vers le problème de diagnostic des défauts et notre objectif est de détecter et d'identifier simultanément l'occurrence des défauts. Basé en ce qui concerne l'approche présentée à la section 4.3.2, nous obtenons :

$$\Delta M_k = \begin{bmatrix} k=0 & k=1 & k=2 & k=3 & k=4 & k=5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Delta \sigma_k = \begin{bmatrix} k=0 & k=1 & k=2 & k=3 & k=4 & k=5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}.$$

À partir de $\Delta M_k(i)$ and $\Delta \sigma_k(j)$ et en utilisant l'algorithme 2, nous pouvons facilement diagnostiquer les défauts dans notre RdPPO. Nous pouvons voir qu'il n'y a pas de défauts dans les quatre premières étapes (c'est-à-dire pour $k = 0, 1, 2, 3$). Pour $k = 4$, on peut voir que $\Delta M_4(i) \neq 0$ pour $i = 11$ (i est déduit de $\Delta M_4(i)$) ce qui signifie l'apparition de défauts (selon la proposition (4)).

Dans ce cas, nous pouvons facilement identifier les défauts à l'aide de l'algorithme 2.

En particulier, après l'étape (B) et l'étape (16) pour $i = 11$, nous concluons qu'un défaut s'est produit en p_{11} .

Or, pour $k = 5$, on peut remarquer que $\Delta M_5(i) \neq 0$ pour $i = 9, 10, 11$ et $\Delta \sigma_5(j) \neq 0$ pour $j = 12$. Selon la proposition (4), on peut détecter l'occurrence de défauts et en suivant l'algorithme 2, on peut identifier ces défauts en utilisant les étapes suivantes :

En commençant par l'étape (A) pour $i = 9, 10, 11$ et $j = 12$ (i et j sont déduite

de $\Delta M_5(i)$ and $\Delta \sigma_5(j)$). On continue vers l'étape (1) pour $l = 12$ et $j = 12$ (l est déduit de W_f et représente la place d'entrée de t_j). L'étape (2) est vérifiée pour $i = 10, 11$ (i est déduit de W_f) et n'est pas vérifiée pour $i = 9$. Les étapes (3) et (4) sont vérifiées pour $q = 9$ (q est donné à partir de $\hat{\Pi}_k^f$ présenté ci-dessus).

Enfin, l'étape (5) est vérifiée uniquement pour $i = 11$ (i est déduit de W).

Par conséquent, nous concluons de l'étape (5) qu'un défaut de place p_l ($l = 12$), un défaut de place p_i ($i = 11$) et un défaut de transition t_q ($q = 9$) se produisent simultanément, c'est-à-dire à l'instant $k = 5$.



FIGURE 4.5 – Mode normal et mode défaillant de p_9 , p_{10} et p_{11} respectivement.



FIGURE 4.6 – Mode normal et mode défaillant de p_{12} et t_{12} respectivement.

Dans cet exemple, nous avons 30 états entre des places et des transitions, 12 états sont mesurés (connue) (6 place observables et 6 transitions observables). Les états restants (12 places non observables et 6 transitions non observables) ne sont pas mesurés (inconnue).

Les résultats des simulations montrent que l'approche proposée est capable d'estimer les états non mesurés ce qui conduit à économiser le coût d'un grand nombre de capteurs (18 capteurs), et également pour détecter et identifier simultanément toute occurrence de défauts même si les défauts se produisent dans un état non mesuré. Le RdP considéré dans ce mémoire présente la simultanéité (t_1 et t_2 dans l'exemple 1), la synchronisation (p_3 et p_4 dans l'exemple 1) et les conflits (t_3 et t_4 dans l'exemple 1).

La principale différence par rapport aux approches citées dans ce chapitre en particulier avec l'approche présentée dans [36] qui a utilisé le même exemple, est que dans notre travail, nous n'exigeons pas que les défauts se produisent seulement dans les transitions ou dans les places mesurés (places observables) mais aussi dans les places non observables et cette technique est en fait complètement nouvelle. Dans [36], les auteurs considèrent qu'un seul défaut peut se produire en transition ou place à l'instant k , alors que dans ce travail nous considérons que deux défauts peuvent se produire à la même instant k , c'est-à-dire à $k = 5$.

Enfin, les résultats de simulation montrent que l'approche proposée reste valable dans le cas où plusieurs transitions se déclenchent en même temps (t_2, t_4 dans l'exemple 1 et t_9, t_{12} dans l'exemple 2).

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, le problème de diagnostic des SED décrit par les RdPPO est adressée. Nous avons proposé des algorithmes de détection et d'identification des défauts utilisant les résultats de la comparaison entre les places et transitions estimés du système défaillant fournis par l'observateur et ceux du système normal. Notez que l'approche proposée ne tient pas compte du cas où les défauts se produisent uniquement dans les transitions comme cela est habituellement utilisé dans la littérature, mais aussi du cas plus général et difficile où les défauts se produisent à la fois dans les transitions et/ou les places (non observables et/ou observables) en même temps.

Conclusion générale et perspectives

conclusion

Le développement de méthodes et d'outils de diagnostic des systèmes est une préoccupation majeure des industriels et de la communauté scientifique du domaine. Ce type d'outils permet de diagnostiquer l'état du système et de détecter les éventuels comportements anormaux de ce dernier. Le travail présenté dans cette thèse s'inscrit dans ce contexte. Nous nous sommes intéressés au diagnostic des SED modélisé par un RdPPO. Le RdP est utilisé afin de donner une modélisation normale et anormale du système étudié. Le modèle de défauts est supposé disponible alors les places et les transitions de fonctionnement anormal représentent respectivement, les modes de défaillances et les défauts qui conduisent le système vers un fonctionnement indésirable. La procédure de l'estimation et de diagnostic du système est déclenchée suite à l'observation d'une séquence de transitions observables à partir d'un marquage initial connu. Pour cela, nous avons proposé une méthode basée sur la synthèse d'un observateur à entrée inconnue afin de détecter les modes de mal fonctionnement (défauts de places) ainsi que les instants d'occurrences de défauts (défauts de transitions) puis nous avons présenté deux algorithmes pour détecter et identifier des défauts basés sur la comparaison des transitions et des marquages estimés du système anormal fournie par l'observateur avec ceux du système normal. Dans ce qui suit, le contenu des différents chapitres est présenté.

Dans le premier chapitre, nous avons donné une définition générale permettant de présenter une large définition de (SED). Ensuite, nous avons introduit les deux formalismes les plus utilisés pour l'analyse des SED : les automates à états finis et les RdP. Notre attention est appuyée sur les RdP qui sont exploitées dans le cadre de notre étude et les différentes notions et notations nécessaires dans la suite du document sont données.

Dans le deuxième chapitre, une présentation de la terminologie utilisée pour le diagnostic de défauts est présentée. Puis, nous avons présenté une revue des résultats significatifs trouvés dans la littérature pour le diagnostic des SEDs modélisés par des RdPs. Nous avons terminé par une comparaison entre les méthodes de diagnostic les plus racontées dans la littérature.

Dans le troisième chapitre, nous présentons d'abord les RdPPO d'une manière formelle, puis nous avons proposé une méthode de synthèse d'un observateur à entrée inconnue.

Dans la quatrième chapitre, nous avons proposé des algorithmes pour diagnostiquer les SED modélisés par les RdPPO basés sur la comparaison des transitions et des marquages du système anormal fournie par un observateur algébrique avec ceux du système normal. Finalement des simulations sous Matlab permettent de vérifier le bien-fondé de la méthode proposée.

Perspective

À l'avenir, il serait utile d'étudier la question problème de sélection optimale des capteurs dans RdPPO. L'objectif est de minimiser le nombre de capteurs tout en maintenant l'observabilité causale. Il serait également intéressant d'utiliser la méthode proposée pour résoudre les problèmes d'estimation ou de diagnostic pour une classe de systèmes hybrides.

Bibliographie

- [1] Ajmone Marsan M., Balbo G., Conte G., Donatelli, S., and Franceschinis G., "Modelling with Generalized Stochastic Petri Nets" John Wiley and Sons, 1995.
- [2] Andra - Ioana VASILIU, Synthèse de contrôleurs des systèmes à événements discrets basée sur les réseaux de Petri, thèse doctorat, 'université de grenoble,2012.
- [3] Cosimo Anglano and Luigi Portinale. Banalisais : abackward reachability analysis for diagnostic problem solving suitable to parallel implementation. In International Conference on Application and Theory of Petri Nets, pages39-58. Springer,1994.
- [4] Fayssal Arichi, Estimation d'état pour des systèmes décrits par les réseaux de Petri : des systèmes à événements discrets aux systèmes dynamiques hybrides, thèse doctorat, Université Aboubekr Belkaid Faculté de Technologie, Tlemcen,2015.
- [5] BELLAHSENE HATEM Noura Rezika, Aide au diagnostic des systèmes dynamiques Hybrides, thèse doctorat, UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETIF1, 2019.
- [6] E. Boutleux, Diagnostic et suivi d'évolution de l'état d'un système par reconnaissance des formes floues. Application au modèle du réseau téléphonique français, Thèse présentée devant l'Université de Technologie de Compiègne, 1996.
- [7] Brams, G., " Réseau de Petri, Théorie et pratique " Tome 1 : théorie et analyse - Tome 2 : modélisation et applications, Masson, 1983.
- [8] J.Brunet, M. Labarrere, D. Jaume, A. Rault, M. Verge, Détection et diagnostic de pannes : approche par modélisation, Traité des Nouvelles Technologies, série Diagnostic et Maintenance, Hermès, 1990.
- [9] Cabasino MP, Giua A, Seatzu C. Diagnosability of discrete-event systems using Labeled Petri Nets. IEEE Trans Autom Sci Eng 2014 ;11(1) :144–53.
- [10] M. Combacau, Commande et surveillance des systèmes à événements discrets complexes : application aux ateliers flexibles, Thèse, Toulouse, 1991.
- [11] C.G. Cassandras and St'éphane Lafortune, Introduction to Discrete Event Systems Second Edition, book,spring,2008.
- [12] Chincholbar K., and Krishnaiah Chetty O., "Stochastic coloured Petri nets for modelling and evaluation, and heuristic rule base for scheduling of fms" International Journal Advanced Manufacturing Technology, 12, pp. 339-348, 1996.
- [13] Christine Choppy, Olivier Bertrand,and Patrice Carle.Coloured petri nets for chronicle recognition. In International Conference on Reliable Software Technologies, pages 266-281.Springer, 2009.

- [14] Chouchane A, Khedher A, Nasri O, Kamoun A. Diagnosis of partially observed Petri net based on analytical redundancy relationships. *Asian J Control* 2019 ;21(5) :1–14.
- [15] Chung SL (2005) Diagnosing PN-based models with partial observable transitions. *Int J Comput Integr Manuf* 18 : 158–169.
- [16] L. Dai, *Singular Control Systems*. Springer, Berlin, Germany, 1989.
- [17] Dandan Y, Jiliang L, Hongye S. Fault diagnosis for discrete event systems using partially observed Petri Nets. *Math Probl Eng* 2020 ;2392904.
- [18] David R., and Alla H., “Autonomous and Timed Continuous Petri Nets”, 11th International Conference on Application and Theory of Petri Nets Paris, France pp. 367-386, June, 1990.
- [19] David R. and Alla H., “Du Grafet aux réseaux de Petri”, Editions Hermès, Paris, 1992.
- [20] David R., Alla H., “Réseaux de Petri Hybrides”, Chapitre 6 de [ZAY, 01], pp. 119-154, 2001.
- [21] R. Debouk, S. Lafortune, D. Teneketzi, Coordinated decentralized protocols for failure diagnosis of discrete event systems, *Discrete Event Dynamic Systems : Theory and Applications*, Vol. 10, N°1-2, pp.33-86, January 2000.
- [22] Demongodin I., “Les réseaux de Petri Lots : modélisation des systèmes de production à haute cadence en régime transitoire”, Thèse de Doctorat, Université de Montpellier, France, 1994.
- [23] Demongodin I., “Generalized Batches Petri Net : Hybrid Model for High Speed Systems with Variable Delays”, *Discrete Event Dynamic Systems : Theory and Applications*, 11(1), pp.137-162, 2001.
- [24] Hedi Dhouibi, , utilisation des reseaux de petri a intervalles pour la regulation d'une qualite :application a une manufacture de tabac,these doctorat, universite Des sciences et technologies de lille ecole centrale de lille ,2005.
- [25] Diaz M., “Les réseaux de Petri : Modèles fondamentaux”, Editions Hermès, Paris, 2001.
- [26] B. Dubuisson, *Diagnostic et reconnaissance des formes*, *Traité des Nouvelles Technologies*, série Diagnostic et Maintenance, Hermès, 1990.
- [27] Dutheil C., Et Haddad S., “Aggregation of states in colored stochastic Petri nets : Application to a multiprocessor architecture”, *Proceeding 3rd International Workshop on Petri nets and performance models*, Los Alamos - CA, IEEE Computer society Press, 1989.
- [28] G. Florin and S. Natkin, *Les Réseaux de Petri Stochastiques*, *Technique et Science Informatiques*, Vol. A, No. 1, pp. 143-160, 1985.
- [29] E Garcia, L.Rodriguez, F Morant, A Correcher, E Quiles, and R Blasco. Fault diagnosis with coloured petri nets using latent nestling method.In *Industrial Electronics, 2008.ISIE 2008. IEEE International Symposium on*, pages986-991. IEEE, 2008.
- [30] S. Genc, S. Lafortune. Distributed diagnosis of discrete event systems using Petri nets. *International Conference on Application and Theory of Petri Nets*, Eindhoven, Netherlands, pp.316-336, 2003.

- [31] Genc S, Lafortune S (2007) Distributed diagnosis of place-bordered Petri nets. *IEEE Trans Autom Sci Eng* 4 : 206–219.
- [32] GONZA Mohaman, Développement d'une méthode structurale de commande par supervision des systèmes à événements discrets modélisés par les réseaux de Petri, these doctorat, UNIVERSITE DE NGAOUNDERE, 2019.
- [33] Giua A, Seatzu C (2005) Fault detection for discrete event systems using Petri nets with unobservable transitions. In : 44th IEEE Conf. on Decision and Control, Seville, pp 6323–6328.
- [34] M. P. Cabasino, A. Guia, S. Lafortune and C. Seatzu, A New Approach for Diagnosability Analysis of Petri Nets Using Verifier Nets, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 57, No. 12, December 2012.
- [35] Haas P. J., "Stochastic Petri Nets : Modeling, Stability, Simulation", Springer-Verlag, New York, 2002.
- [36] Wu Y, Hadjicostis NC. Algebraic approaches for fault identification in discrete-event systems. *IEEE Trans Robot Autom* 2005 ;50(12) :2048–53.
- [37] Haddad S., "Une catégorie régulière de réseaux de Petri de haut niveau : définition, propriétés et réduction", Thèse de Doctorat, Université Paris VI, 1987.
- [38] HAOUES MOHAMMED, l'utilisation conjointe des réseaux de petri stochastiques et des processus de markov pour la modélisation, l'analyse et l'évaluation des performances d'un système de production : ligne d'emboutissage de l'entreprise b.a.g batna, thèse magister , université el-hadj lakhdar BATNA, 2006.
- [39] M. Hou and P. C. Muller, Causal observability of descriptor systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 44, pp. 158-163, Jan. 1999.
- [40] R. Isermann, Process fault detection based on modeling and estimation methods a survey, *Automatica*, vol. 20, no 4, 1984
- [41] Jensen K., "Coloured Petri nets. In : High-Level Petri Nets : Theory and Application", Berlin : Springer-Verlag, 1991.
- [42] KACEM Ibrahim, Diagnostic des systèmes à évènements discrets complexes par réseaux de Petri, thèse doctorat, UNIVERSITÉ FERHAT ABBAS - SETTIF1, 2020.
- [43] Bassam Kattan, Synthèse structurale d'un contrôleur basée sur le Grafset, thèse doctorat, université Joseph Fourier – Grenoble 1, 2004.
- [44] D. Koenig and S. Mammar, Design of proportional-integral observer for unknown input descriptor systems, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 47, No. 12, 2002.
- [45] Dimitri Lefebvre and Catherine Delherm. Diagnosis of des with petri net models. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 4(1) :114-118, 2007.
- [46] Lefebvre D. Fault diagnosis and prognosis with partially observed Petri nets. *IEEE Trans Syst Man Cybern : Syst* 2014 ;44(10) :1413–24.
- [47] Lefebvre D. On-line fault diagnosis with partially observed Petri nets. *IEEE Trans Automat Control* 2014 ;59(7) :1919–24.
- [48] Lindemann C., "Performance Modelling with Deterministic and Stochastic Petri Nets", John Wiley and Sons, 1998.

- [49] I. Lrivera-rangel, A. Ramirez-trevino, L. Aguirre-salas and J. Ruiz-leo, Geometric characterization of observability in Interpreted Petri nets, *Kybernetika*, Vol. 41, No. 5, pp. 553-574, 2005.
- [50] Maen ATLI, Contributions à la synthèse de commande des systèmes à événements discrets : nouvelle modélisation des états interdits et application à un atelier flexible, thèse doctorat, l'Université de Lorraine, 2012.
- [51] Merlin P. M., "A study of the recoverability of computing systems", PhD thesis, Department of Information and Computer Science, University of California, Irvine, CA, 1974.
- [52] Molloy M.K., "Performance analysis using Stochastic Petri Nets" *IEEE Transactions on Computers*, C-31(9), pp. 913-917, September 1982.
- [53] T. Murata, Petri nets : Properties, analysis and applications, in *Proceedings IEEE*, Vol. 77, No. 4, pp. 541-580, 1989.
- [54] Natkin S., "Les réseaux de Petri stochastiques", Thèse de Doctorat, CNAM, Paris 1980.
- [55] Ramchandani C., "Analysis of asynchronous concurrent systems by timed Petri nets", PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, Project MAC Report MAC-TR-120. 1974.
- [56] Antonio Ramirez-Trevino, Elvia Ruiz-Beltran, Jesus Aramburo- Lizarraga, and Ernesto Lopez-Mellado. Structural diagnosability of des and design of reduced petri net diagnosers. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A : Systems and Humans*, 42 (2) : 416-429, 2012.
- [57] Ru Y, Hadjicostis NC. Fault diagnosis in discrete event systems modeled by partially observed Petri nets. *Discrete Event Dyn Syst* 2009 ;19(4) :551–75.
- [58] Y. Ru and C. N. Hadjicostis, Sensor selection for structural observability in discrete event systems modeled by Petri nets, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 55, No., pp. 1751-1764, 2010.
- [59] Saadi Djallel, Synthèse des Superviseurs : Approche basée sur la Théorie des Réseaux de Petri, these MAGISTER, Faculté des Sciences, Oran 2011.
- [60] Sampath M, Sengupta R, Lafortune S, Sinnamohideen K, Teneketzis D (1995) Diagnosability of discrete event systems. *IEEE Trans Automat Contr* 40 :1555–1575.
- [61] M. Sampath, A hybrid approach to failure diagnosis of industrial systems, In *Proceeding American Control Conference*, Arlington, VA, USA, June 2001.
- [62] Terchi Roqiya et Mezahi Bochra, Le Développement d'un Outil de Transformation des Modèles Orientés Aspect vers les Réseaux de Pétri, Basé sur la Transformation De Graphes, Master, Centre Universitaire Abd Elhafid Bousouf Mila, 2018.
- [63] Ushio T, Onishi I, Okuda K (1998) Fault detection based on Petri net models with faulty behaviors. In : *Proc. of IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics*, San Diego, pp 113–118.
- [64] Wang Jiacun, "Timed Petri Nets : Theory and Application", Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [65] Wu Y, Hadjicostis NC. Algebraic approaches for fault identification in discrete-event systems. *IEEE Trans Robot Autom* 2005 ;50(12) :2048–53.

-
- [66] Yin L, Zhiwu L, Naiqi W. Fault Diagnosis in DESs modeled by partially observed petri nets. In : IEEE international conference on automation science and engineering (CASE). Fort Worth, TX, USA ; 2016. pp. 21–4.
- [67] S. H. ZAD, R. H Kwong, W. M.Wonham, Fault diagnosis in discrete event systems : framework and model reduction,IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 48, no 7, pp. 1199-1212, 2003.
- [68] Zhou MengChu, and DiCesare Frank., “Petri Net Synthesis for Discrete Cotrol of Manufacturing Systems”, Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [69] Zhu G, Li Z, Wu N. Model-based fault identification of discrete event systems using partially observed Petri nets. *Automatica* 2018 ;96 :201–12.
- [70] Zhu G, Li Z, Wu N, Al-Ahmari A. Fault identification of discrete event systems modeled by Petri Nets with unobservable transitions. *IEEE Trans Syst Man Cybern : Syst* 2019 ;49(2) :333–45.