

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA  
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE  
Département : ELECTRONIQUE  
Domaine : SCIENCES ET TECHNIQUES  
Filière : ELECTRONIQUE  
Spécialité: Automatique Informatique Indus

## Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**MODELISATION D'UN SYSTEME DE PRODUCTION  
PAR UN MODELE GRAPHIQUE BASE SUR LES RdP**

Présenté par : Mebarek Khaoula Nour El Houda

Encadrant: KHLDOUNA Z.

Grade: MCB

Université: UBMA

### Jury de Soutenance :

BENSAKER B.	Pr.	Badji Mokhtar Annaba	Président
KHELDOUNA Z.	M.C	Badji Mokhtar Annaba	Encadrant
FEZZARI M.	Pr.	Badji Mokhtar Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2021/2022

# *Remerciements*

*En premier Je remercie Dieu, le tout puissant, qui m'a donné la force la volonté, le courage et la patience pour supporter toutes les difficultés afin de réaliser ce modeste travail.*

*Je tiens à remercier tout particulièrement mon encadreur Mlle Z.Khaldouna pour son assistance et sa gentillesse tout au long de ce travail, qu'elle trouve ici l'expression de ma gratitude pour sa patience, son aide et ces précieux conseils.*

*J'adresse également mes plus vifs remerciements à Monsieur B.Bensaker ainsi à Monsieur Fezzari pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce modeste travail.*

.

*En fin, je tiens à remercier vivement ma chère mère, mon cher père mes frères et sœur sans oublier tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à élaborer ce projet, ainsi tous les collègues de ma promotion.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire à :*

*Mes cher parents, ma sœur et mes frères.*

*Incontestablement, à mon encadreur qui a*

*fait de grands efforts pour accomplir  
ce modeste travail.*

## **RESUME**

La configuration des systèmes de production est très diversifiée. Elle dépend du type d'opération à effectuer tels que les notions de cadencement, de temps de production, les aléas de fonctionnement ou autres perturbations.

Ainsi, pour représenter le site de production, dans sa configuration matérielle, il est nécessaire d'organiser des modèles représentant des structures essentielles d'usinage, d'assemblage, de stockage, de traitement sans oublier également l'aspect temporel.

Le modèle doit être suffisamment proche de la réalité fonctionnelle du système afin de pouvoir s'y substituer pour la simulation et la vérification des projets

L'exploitation de la théorie associée aux RdP permet, par la recherche des P et T invariants de répondre à de nombreux problèmes. La diversité des configurations des systèmes de production et la demande de flexibilité de ces systèmes en temps réel, nous amènent à considérer l'évolutivité possible des modèles en vue de la simulation.

## **ABSTRACT**

The configuration of production systems is very diverse. It depends on the type of operation to be carried out such as the notions of timing, production time, operating hazards or other disturbances. Thus, to represent the production site, in its material configuration, it is necessary to organize models representing essential structures of machining, assembly, storage, treatment without forgetting also the timing aspect.

The model must be sufficiently close to the functional reality of the system in order to be able to replace it for the simulation and verification of projects.

The exploitation of the theory associated with the Petri Network allow by

the search for the no variant P and T to answer many problems. The diversity of the configuration of the production systems and the demand for flexibility of these systems in real time lead us to consider the possible evolution of the models for simulation.

## ملخص

تكوين أنظمة الإنتاج متنوع للغاية. يعتمد ذلك على نوع العملية التي سيتم تنفيذها مثل مفاهيم التوقيت أو وقت الإنتاج أو مخاطر التشغيل أو الاضطرابات الأخرى. وبالتالي ، لتمثيل موقع الإنتاج ، في تكوينه المادي ، من الضروري تنظيم النماذج التي تمثل الهياكل الأساسية للألات والتجميع والتخزين والمعالجة دون إغفال الجانب الزمني أيضاً. يجب أن يكون النموذج قريباً بدرجة كافية من الواقع الوظيفي للنظام حتى يتمكن من استبداله لمحاكاة المشاريع والتحقق منها. يسمح استغلال النظرية المرتبطة بـ Rdp ، من خلال البحث عن الثابت P و T للإجابة على العديد من المشاكل. يقودنا تنوع تكوينات أنظمة الإنتاج والطلب على مرونة هذه الأنظمة في الوقت الفعلي إلى النظر في قابلية التوسع المحتملة لنماذج المحاكاة.

## Liste des figures

Figure 1.1 Exemple de transfert.....	16
Figure 1.2 Exemple d'assemblage sur une machine.....	17
Figure 2.1 RdP (place, transition, jeton).....	30
Figure 2.2 Exemple de marquage initial.....	31
Figure 2.3 Graphe de marquage accessible.....	32
Figure 2.4 Avant et après franchissement.....	33
Figure 2.5 Matrice d'incidence.....	34
Figure 2.6 Un reseau de Petri.....	34
Figure 2.7 RdP borné/non borné.....	36
Figure 2.8 RdP pseudo vivant.....	36
Figure 2.9 RdP quasi vivant.....	37
Figure 2.10 RdP vivant.....	37
Figure 2.11 RdP sans et avec blocage.....	38
Figure 2.12 Rdp réinitialisable et non réinitialisable.....	38
Figure 2.13 Exemple RdP autonome.....	39
Figure 2.14 EdP général.....	39
Figure 2.15 RdP à capacité.....	40
Figure 2.16 RdP inhibiteur fnchissabler.....	41
Figure 2.17 RdP coloré.....	41
Figure 2.18 RdP P et T temporisé.....	43
Figure 3-1- La cellule de production flexible.....	49
Figure 3-2- Réseau de pétri en Sirphyco.....	56
Figure 3-3-Les graphe de temps de place .....	57
Figure 3.4: RdP d e dépannage de M1.....	59

<b>Figure 3-5: les graphe de temps avec dépannage de M1.....</b>	<b>60</b>
<b>Figure 3-6 RdP de dépannage de M2 .....</b>	<b>62</b>
<b>Figure 3-7 les graphe de temps avec dépannage de M2.....</b>	<b>63</b>
<b>Figure 3-8: RdP de dépannage de M3.....</b>	<b>65</b>
<b>Figure 3-9: les graphe de temps avec dépannage de M3.....</b>	<b>66</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableaux 1.1 Classement.....</b>	<b>21</b>
<b>Tableaux 2.1 Type de structure particuliere de RdP.....</b>	<b>35</b>
<b>Tableau 3.1: de numérotation des place de Rdp en Sirphyco.....</b>	<b>55</b>
<b>Tableau 3.2: de temps de fabrication.....</b>	<b>58</b>
<b>Tableau 3.3: de temps de fabrication .....</b>	<b>61</b>
<b>Tableau 3.4 : de temps de fabrication.....</b>	<b>64</b>
<b>Tableau 3.5: de temps de fabrication.....</b>	<b>67</b>

# Sommaire

Resumé.....	1
Abstract.....	1..
Liste des figures.....	4
Liste des tableaux.....	6
Sommaire.....	7
Introduction Générale.....	10
<b>Chapitre 1: Systèmes de Production Automatisée et Modélisation</b>	
<b>1- Les systèmes de production automatisés.....</b>	<b>12</b>
1.1 Introduction.....	12
1.2 L’atelier de production.....	15
1.2.1 Types de machines.....	15
1.2.2 Ateliers de fabrication.....	15
1.2.2.1 Ligne de fabrication (lignes de transfert).....	15
1.2.3 Ateliers d’assemblage et/ou de désassemblage.....	17
1.2.3.1 Les machines et les robots.....	18
1.2.4 Les stocks, les convoyeurs et les approvisionnements.....	18
1.2.4.1 Les moyens de transport	
1.2.4.2 Les stocks.....	18
1.3 La complexité des sites.....	19
<b>2- La Modélisation.....</b>	<b>20</b>
2.1 Introduction.....	20
2.2 Définition de la modélisation.....	20
2.3 Objectif de la modélisation.....	21
2.3.1 Modélisation informelle.....	21
2.3.2 Modélisation semi-formelle.....	22
2.3.3 Modélisation formelle.....	22
2.4 Modélisation des systèmes de production.....	23
2.4.1 Modèles discrets.....	23
2.4.2 Modèles continus.....	25
2.4.3 Modèles à flux continu.....	25
2.5 Conclusion.....	26
<b>Chapitre 2: Les réseaux de Pétri.....</b>	<b>27</b>
2. Les réseaux de pétri.....	28

<b>2.1-Introduction.....</b>	<b>28</b>
<b>2.2-La modélisation par les réseaux de Pétri.....</b>	<b>29</b>
<b>2.3-Définitions fondamentales.....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.1-Définition informelle.....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.2-Définition formelle.....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.3-Le marquage.....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.4-Grphe des marquages accessibles.....</b>	<b>31</b>
<b>2.4-Franchissement d'une transition.....</b>	<b>32</b>
<b>2.5-Matrice d'incidence W.....</b>	<b>33</b>
<b>2.6-Équation caractéristique et Vecteur caractéristique.....</b>	<b>34</b>
<b>2.7 Les structures particulières des réseaux de Pétri.....</b>	<b>35</b>
<b>2.8-Les propriétés des réseaux de Pétri.....</b>	<b>35</b>
<b>2.9-Extensions de Réseaux de Pétri.....</b>	<b>38</b>
<b>2.9-1-Réseaux de Pétri autonomes.....</b>	<b>38</b>
<b>2.10-Réseaux de pétri non autonomes.....</b>	<b>42</b>
<b>2.11-Le RdP stochastique.....</b>	<b>44</b>
<b>2.12-Le RdP continu.....</b>	<b>44</b>
<b>2.13-Le RdP hybride.....</b>	<b>44</b>
<b>2.14-La méthode de modélisation par le RdP.....</b>	<b>45</b>
<b>2.15 Conclusion.....</b>	<b>45</b>

### **chapitre3: Simulation d'un Model Graphique apartir du RdP**

#### **Temporisé**

<b>3.1-Introduction .....</b>	<b>47</b>
<b>3.2- Simulation du modèle de conduite.....</b>	<b>47</b>
<b>3.2-1- Introduction.....</b>	<b>47</b>
<b>3.2-2- Simulation par l'équation d'évolution du marquage.....</b>	<b>47</b>
<b>3.3- Algorithme de simulation.....</b>	<b>48</b>
<b>3.4 -Composition de la cellule de production flexible.....</b>	<b>49</b>
<b>3.4.1- Plan de charges.....</b>	<b>50</b>
<b>3.4.2- Base de données .....</b>	<b>50</b>

<b>3.5- Conduite du système de production flexible.....</b>	<b>51</b>
<b>3.5.1- Problématique.....</b>	<b>51</b>
<b>3.5-2-Modélisation à base des RdP .....</b>	<b>51</b>
<b>3.6-Simulation.....</b>	<b>54</b>
<b>3-7-Procédure de dépannage.....</b>	<b>59</b>
<b>3-7-1-Dépannage M1.....</b>	<b>50</b>
<b>3-7-2-Dépannage M2 .....</b>	<b>63</b>
<b>3-7-3-Dépannage M3 .....</b>	<b>66</b>
<b>3.8 Conclusion .....</b>	<b>60</b>
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>70</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>71</b>

## INTRODUCTION GENERALE

Les usines et en particulier les ateliers de production, de plus en plus complexes grâce à leur degré d'automatisation et leur grande flexibilité, doivent assurer la continuité de leur service et la qualité de leur produit. Cette performance globale d'un système de production est le résultat d'une interaction complexe des différents services : production, stock, manipulation, approvisionnement, etc. Cette complexité nécessite de représenter le système industriel sous forme de modèle, afin de mieux apprécier le comportement de l'atelier dans ses différentes simulations.

Pour comprendre un système réel que l'on ne peut pas observer ou expérimenter directement, parce que c'est un prototype ou parce que cela est trop difficile à manipuler, il faut avoir une représentation adéquate du système lui même. Ceci revient à développer un modèle fiable et qui se rapproche le plus possible de la réalité. Parmi les nombreux outils utilisés dans la modélisation, la spécification et l'évaluation du comportement dynamique des processus industriels ; les réseaux de Petri (RdP) sont largement utilisés, dans ce domaine et donnent une très bonne approche avec des résultats satisfaisants.

Les réseaux de petri (RdP) sont un outil graphique et mathématique qui trouvent leur domaine d'application dans un grand nombre de secteurs où les notions d'événements et d'évolutions simultanées (parallèles) sont importantes.

Cette théorie est encore jeune car elle est née de la thèse de Carl Adam Petri, intitulée « Communication avec des Automates » présentée en 1962 à l'université de Darmstadt en Allemagne .Un peu plus tard et au début des années 70, ce travail a été développé par Anatol W. Holt, F.Commoner, M. Hack et leurs collègues dans le groupe de recherche de Massachusetts Institute Of Technology (MIT).En 1975 MIT organise la première conférence sur les réseaux de Petri et les méthodes relationnelles. Par la suite, J. Peterson a publié en 1981, le premier ouvrage sur les réseaux de Petri (2).

Parmi les champs d'application des RdP, on peut citer:

- L'évaluation des performances de systèmes discrets,
- Les protocoles de communication,
- La commande des ateliers de fabrication,
- La conception de logiciels temps-réel,
- Les systèmes d'information,
- Les interfaces Homme-Machine,

« **sirphyco** » qui permet de modéliser et de simuler un système de production hybride basé sur les réseaux de Petri hybrides.

Ceci montre bien la diversité d'utilisation des RdP qui donnent cette modélisation très satisfaisante. Beaucoup de chercheurs continuent à utiliser les RdP sous leur différente forme, car ils présentent beaucoup d'avantages. Parmi ces avantages on peut citer quelques uns et qui sont :

- Ils offrent un support graphique naturel pour les concepteurs.
- Ils permettent de modéliser la relation de précedence et l'intégration structurelle des événements stochastiques parallèles et asynchrones.
- Les conflits et les capacités des stocks tampons peuvent être facilement modélisés.
- Les éventuels blocages dans le modèle RdP d'un système peuvent être détectés.
- Les extensions diverses des réseaux de Petri, comme les RdP stochastiques, temporisés et colorés permettent d'analyser l'utilisation des ressources tel que la défaillance et la productivité.
- Les modèles réseaux de Petri fournissent une plate forme structurelle pour effectuer une analyse systématique des systèmes complexes.
- Les RdP peuvent être utilisés pour implémenter des systèmes de contrôle en temps réel, et bien d'autres applications.

Après avoir présenter et introduit les systèmes de production ainsi que les différents ateliers de production, de fabrication, d'assemblage dans le chapitre I; nous nous sommes intéressé aussi a introduire les définitions de la modélisation et de ses objectifs.

Dans le chapitre II nous avons présenté l'historique, les propriétés et les extensions des RdP. et de vérifier le bon fonctionnement de notre système de production à l'aide des RdP.

Au chapitre III, On termine par la réalisation du réseau de Pétri de notre système de production constitué de trois machines, sa simulation à l'aide du logiciel «

**Sirphyco** » nous permet de présenter des résultats et on conclura avec des commentaires.

# **CHAPITRE 1**

## **SYSTEMES DE PRODUCTION AUTOMATISEE ET MODELISATION**

# **SYSTEMES DE PRODUCTION AUTOMATISEE ET MODELISATION**

## **1- Les systèmes de production automatisés**

### **1.1 Introduction**

La description des architectures propres aux systèmes de production n'est pas une chose simple, vue la diversité des configurations. Ainsi, ces architectures sont de formes diverses, dépendant des configurations locales, du type de produit à fabriquer, des cahiers des charges et donc des objectifs. quantitatifs et qualitatifs.

Les solutions choisies pour atteindre les objectifs souhaités en terme de production amènent nécessairement à des structures différentes. Bien qu'il y ait des méthodologies qui aient été développées pour la construction des sites, on ne peut cependant pas observer de démarche systématique dans l'élaboration de tels projets.(1)

Lorsque nous sommes amenés à visiter des sites industriels, il est vrai que nous retrouvons systématiquement des modes d'agencement communs qui nous semblent incontournables. Cependant, il est aussi vrai que chaque site de production a sa spécificité, liée à tout un historique de fabrication.

Au fil de l'évolution des marchés, les entreprises se sont développées ou ont connu des périodes de récession, modifiant ainsi leurs organisations et leurs configurations matérielles, l'entreprise doit s'adapter, en temps réel, suivant ainsi ces transformations technologiques et ces fluctuations quasi permanentes du marché. Ces transformations sont une composante de la flexibilité de l'entreprise.

A l'échelle des décennies, où l'on observe un glissement des objectifs de production, à l'échelle de l'année ou des saisons, où les besoins en terme de production peuvent être périodiques ou irréguliers, éventuellement tributaires des événements politiques, sociaux ou économiques, à l'échelle quotidienne ou hebdomadaire, où l'organisation de la production est amenée à fluctuer en fonction de la demande, bien souvent de manière cyclique.(2)

La configuration des systèmes de production est très diversifiée. Elle est pleinement tributaire du type d'opération à effectuer et de la catégorie d'objets à produire ou à traiter. De multiples critères entrent nécessairement en compte aussi bien en terme de quantité à fabriquer que de complexité de l'objet. Les notions de cadencement et de temps de production sont primordiales, autant que la prise en compte des aléas de fonctionnement ou autres perturbations qui viennent contrarier l'optimisation.(1)

Ainsi, pour représenter le site de production, dans sa configuration matérielle, il va falloir prendre en compte une grande quantité de paramètres à des niveaux diversifiés de conceptualisation. Cela signifie qu'il sera nécessaire d'organiser des modèles représentant des structures de premier ordre, ou de premier degré (nous entendons par là, les structures essentielles telles que robots, machines d'assemblage, de traitement, d'usinage, stocks,...). A un niveau supérieur, nous devons représenter les systèmes de surveillance et de commande. Il est également indispensable de représenter les flux de production et les perturbations subies par les systèmes et les approvisionnements. Nous ne devons pas oublier également l'aspect temporel, dont la représentation et la prise en compte peut être abordée comme une couche supplémentaire de nos modèles.(1)

Ne perdons pas de vue qu'une dualité forte doit apparaître entre le système et sa représentation par un modèle. Celui-ci doit être suffisamment proche de la réalité fonctionnelle du système afin de pouvoir s'y substituer pour la simulation et la vérification des projets. Un dialogue doit s'instaurer entre système et modèle de manière à faire évoluer le système de production et éventuellement le commander.(10)

## **1.2 L'atelier de production.**

Les ateliers de production sont généralement constitués des:(5)

- types de machines

- les ateliers de fabrication,
- les ateliers d'assemblage/désassemblage.

**1.2.1 Types de machines :** Elles sont constituées des:

- 2 machines qui permettent une ou plusieurs opérations consécutives sur un même produit,
- 3 les machines multitâches qui font plusieurs opérations différentes,
- 4 les machines d'assemblage qui effectuent des opérations d'assemblage sur plusieurs produits pour obtenir un produit unique, et les machines de désassemblage qui effectuent l'opération inverse,
- 5 les machines d'inspection qui ont pour tâche de contrôler la qualité des produits fabriqués.(8)

**1.2.2 Ateliers de fabrication**

Ils sont constitués de lignes de fabrication ou ligne de transfert(8), d'ateliers à flots (flow- shops) dont les pièces ne passent pas forcément sur toutes les machines, et d'ateliers à tâches (job-shops). Ces derniers permettent de fabriquer plusieurs produits différents, et l'ordre de passage sur les machines n'est pas fixe. Nous nous intéressons dans la suite de notre étude aux lignes de fabrication (ou lignes de transfert) ne fabriquant qu'un seul type de produits.

**1.2.2.1 Ligne de fabrication (lignes de transfert)**

Une ligne de transfert est un système de production avec une structure très spéciale. Elle est conçue pour produire un seul type de produits. Elle est composée d'un réseau linéaire de machines ( $M_1, M_2, \dots, M_N$ ) séparées par des stocks ( $B_1, B_2, \dots, B_{N-1}$ ) comme il est montré dans la Fig. 1.1. Les matières arrivent de l'extérieur du système sur la machine  $M_1$ , puis dans  $B_1$ , ensuite sur  $M_2$ , et ainsi de suite jusqu'à la dernière machine  $M_N$  où elles quittent le système.(9)

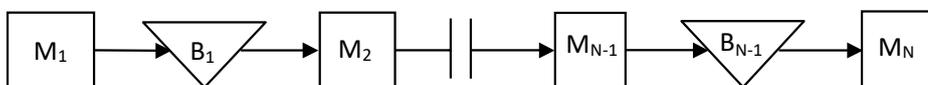


Fig. 1.1 – Exemple d'une ligne de transfert

La première ligne de transfert est composée de trois machines. Elle a été installée en 1908 pour fabriquer les rails de chemin de fer. Ensuite, dans les années 20 et 30 des lignes de transfert de 6 à 8 machines ont été développées. Des lignes de transfert de 60 à 80 machines ont été développées et utilisées dans l'industrie d'automobile vers les années 50.(9)

Le produit est fabriqué selon la gamme de fabrication. Une gamme de fabrication est une suite ordonnée de phases qui définissent un processus. La phase est l'ensemble ordonné des opérations exécutées par un ou plusieurs opérateurs ou opératrices à un poste de travail.

Les gammes de fabrication peuvent être de différentes natures, on distingue les gammes homogènes, les gammes analogues et les gammes disparates.(7)

- Des gammes sont homogènes quand elles remplissent les conditions suivantes :

- la liste des phases est identique ;
- les temps alloués par opération sont similaires (écart relatif des temps de chaque phase de 10 à 20%).

- Comparées aux gammes homogènes, des gammes sont considérées comme analogues si certaines phases de même nature peuvent être exécutées sur une même machine ou sur un même poste de travail. On peut considérer que des gammes sont analogues si les produits passent chronologiquement par les mêmes postes principaux (dans le même ordre) avec des temps dont la valeur peut varier dans un rapport de 1 à 3 maximum.

- Des gammes sont considérées disparates dans les cas suivants :

- si l'ordre des phases est différent,
- si les postes de travail ne sont pas les mêmes,
- si les temps par phase sont très différents.

### **1.2.3 Ateliers d'assemblage et/ou de désassemblage**

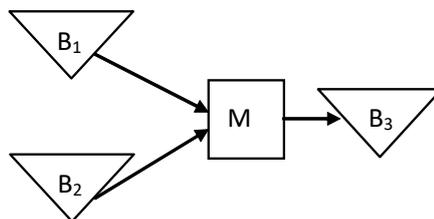
La plupart des ateliers d'assemblage et de désassemblage sont conçus pour la fabrication d'un seul type de produits et leur fonctionnement est analogue aux lignes de fabrication ; excepté que (6) :

- cet atelier nécessite en générale la présence de plusieurs pièces à son entrée pour lancer la fabrication
- une machine d'assemblage ou désassemblage est bloquée si au moins un de ses stocks d'entrée est vide.

Un processus d'assemblage permet la fabrication d'une seule pièce à partir de deux ou plusieurs pièces séparées. Par contre, un processus de désassemblage est un processus dans lequel une seule pièce est séparée dans deux ou plusieurs pièces. Presque tous les produits manufacturés sont assemblés (automobiles, équipements électroniques, etc.).

Le processus d'assemblage est le plus courant dans la production, mais nous incluons les processus de désassemblage car ils n'ajoutent aucune difficulté au niveau de l'étude, même s'ils se manifestent plus rarement.(6)

La Fig. 1.2 est un exemple d'atelier d'assemblage constitué de trois stocks notés  $B_1$ ,  $B_2$ , et  $B_3$ , et une machine d'assemblage  $M$ . Les pièces sont stockées en entrée dans  $B_1$  et  $B_2$ , pour être ensuite transformées par la machine d'assemblage  $M$ .  $B_3$  permet de stocker en sortie les pièces



produites.

Fig. 1.2 – Exemple d'assemblage sur une machine

La complexité des systèmes de production est principalement liée au nombre de composants (machines, stocks et pièces à fabriquer) et à la nature des produits fabriqués. Dans cette étude, nous considérons que les machines sont toujours séparées entre elles par des stocks intermédiaires, et que les entrées et les sorties du système sont représentées par des stocks. De plus, les machines considérées sont de type mono-serveur et ne peuvent produire qu'une seule pièce à la fois.

Comme les systèmes actuels de production sont très complexes, la compréhension du fonctionnement réel de ces systèmes devient très difficile. Il est donc primordial d'avoir un bon modèle du système physique afin de comprendre de façon plus complète le comportement de ce système en

réduisant sa complexité et de pouvoir ensuite lui faire atteindre les objectifs souhaités.

### **1.2.3.1 Les machines et les robots**

C'est dans la même rubrique que l'on classera ces deux éléments topologiquement très proches l'un de l'autre dans l'entreprise. Dans un premier temps on peut dire que la fonctionnalité d'une machine est de transformer un objet par usinage ou par traitement. On peut en définir une (ou plusieurs) entrées et une sortie. La machine impose des contraintes liées à son rendement et à ses capacités en terme d'opérations. Les modèles devront être aptes à décrire la fonctionnalité de cette machine le plus simplement possible.(5)

Le robot est un objet apte à fournir en temps voulu l'objet à la machine. Il est soumis à des contraintes liées aux flux des objets en amont et en aval. Là encore, les modèles devront être aptes à décrire ces comportements et ces contraintes le plus simplement, mais le plus rigoureusement possibles.

L'interconnexion entre robots et machines devra être assurée au niveau des modèles où la notion de partage de ressources sera à considérer.

## **1.2.4 Les stocks, les convoyeurs et les approvisionnements**

### **1.2.4.1 Les moyens de transport peuvent être :**

- des convoyeurs qui sont utilisés pour le déplacement de produits lourds ou à fort débit,
- des ponts roulants qui permettent d'éviter la gêne des obstacles au sol,
- des chariots filoguidés qui permettent d'assurer le déplacement d'un produit d'un point quelconque de l'atelier à un autre,
- des robots qui effectuent des déplacements courts et rapides pour les produits légers.

### **1.2.4.2 Les stocks** sont utilisés pour absorber les aléas et réguler la production. Nous trouvons

- les stocks tampons dédiés qui sont utilisés pour stocker les produits entre deux opérations consécutives. Ils peuvent avoir des capacités limitées ou illimitées,
- les stocks partagés qui sont utilisés par plusieurs produits en même temps.

Cette rubrique regarde la disponibilité des objets à traiter et leur situation « géographique » sur le site de production. Il s'agit, concernant

ces objets, des matières premières en approvisionnement, qui doivent être disponibles dans les meilleurs délais possibles. Il s'agit également des pièces en cours de traitement ou d'usinage.(9)

Ces objets sont introduits dans la structure sous forme de « matière première » (pour le site de production) et peuvent être stockés à divers endroits (stocks d'entrée et de sortie du site, stock d'entrée et de sortie de chaque machine, stock intermédiaire). Ces objets circulent d'autre part à travers la structure grâce à des convoyeurs et sont transformés ou assemblés pour parvenir à l'état final souhaité.

### **1.3 La complexité des sites**

L'architecture du site de production est évolutive. Elle part nécessairement, dans sa conception d'une structure relativement simple pour se complexifier au fur et à mesure que l'on prend en compte tous les éléments nécessaires pour la réalisation d'un produit finalisé. Cette complexité est de deux ordres : dans la structure du site, élément statique et dans l'organisation de la production, élément dynamique. Ces deux notions sont interactives car il est clair que la disposition des divers éléments constitutifs, ainsi que leur nombre dépendra de l'organisation qui sera choisie. A l'inverse, l'organisation de la production est dépendante des outils dont on dispose.(7)

Un exemple simple permet d'éclairer ces propos : afin de produire un type donné d'objet, on pourra choisir de distribuer les tâches à un nombre donné de machines effectuant des opérations identiques sur plusieurs objets en parallèle. On pourra également affecter un robot à plusieurs opérations différentes sur plusieurs machines. Il s'agira alors d'organiser la production en vue de l'optimisation en fonction des choix matériels qui auront été faits.

Ces réflexions vont naturellement nous amener par la suite à aborder les problèmes récurrents du partage des ressources (robot par exemple), de la disponibilité des ressources et des matières premières, du séquençement des tâches, de la prise en compte des événements extérieurs perturbateurs.

## **2- La Modélisation**

### **2.1 Introduction**

L'un des problèmes majeurs de l'industrie a toujours été : <comment produite plus à moindre coût avec l'arrivée de l'automatisation, les industriels ont pu réduire les coûts de production et produire des biens plus sophistiqués . L'automatisation a par ailleurs permis de réduire la pénibilité du travail, et nous sommes tous confrontés à elle de manière directe ou indirecte ( téléphone portable ,ordinateur ,etc.). Cependant ,toujours dans une idée de diminuer les coûts tout en améliorant la performance, l'ensemble des problèmes liés à l'utilisation de systèmes automatisés n'a pas encore été résolu de manière optimale . La recherche dans le domaine de la modélisation des systèmes a pour but de répondre à ce besoin.(3)

La modélisation facilite la compréhension du fonctionnement d'un système avant sa réalisation en produisant un modèle. Dans cette partie nous présentons des définitions de base de la modélisation avec ces différents types.

## **2.2 Définition de la modélisation**

La modélisation est le processus de spécification du modèle, elle consiste à représenter le système sous forme de modèles en utilisant des concepts prédéfinis dans un langage de modélisation. La modélisation est une des tâches les plus importantes dans le processus de développement d'un système. La phase consacrée à l'analyse peut être considérée comme plus stratégique que celles dévolues à la conception et l'implémentation proprement dites. Il faut en effet fondamentalement représenter, comprendre et identifier les exigences du système afin de concevoir puis d'implémenter une application stable et performante. Avec l'augmentation de la complexité des systèmes à élaborer, le choix d'une méthode de développement appropriée se révèle primordial pour le succès des travaux. Pour cela, il existe plusieurs orientations disponibles, c'est-à-dire des approches différentes pour comprendre, représenter, analyser et concevoir un système. Le problème sera décomposé en plusieurs modèles différents liés entre eux.(11)

## **2.3 Objectif de la modélisation**

La modélisation permet de mieux comprendre le système à développer. Donc il permet de:

- Visualiser le système comme il est ou comme il devrait l'être.
- Valider le modèle vis-à-vis des clients.
- Spécifier les structures de données et le comportement du système.
- Fournir un guide pour la construction du système.

➤ Documenter le système et les décisions prises

La modélisation peut être classée selon le degré du formalisme des langages ou des méthodes utilisés. Ainsi, la modélisation peut être considérée comme étant formelle, semi-formelle ou informelle. Le tableau ci-dessous présente une définition des catégories de langages ainsi que des exemples de langages ou des méthodes utilisées dans la modélisation. (10)

**Tableau 1.1 Classification et utilisation de langages ou de méthodes.**

Catégories de langages			
Langage Informel		Langage Semi-Formel	Langage Formel
Simple	Standardisé		
Langage qui n'a pas un ensemble complet de règles pour restreindre une construction.	Langage avec une structure, un format et des règles pour la composition d'une construction.	Langage qui a une syntaxe définie pour spécifier les conditions sur lesquelles les constructions sont permises.	Langage qui possède une syntaxe et une sémantique définies rigoureusement. Il existe un modèle théorique qui peut être utilisé pour valider une consultation.
Exemples de Langage ou Méthodes			
Langage naturel.	Texte structuré en langage naturel.	Diagramme entité-relation, Diagramme à objet	Réseaux de pétri, machines à états finis, VDM,Z

### 2.3.1 Modélisation informelle

Le processus de modélisation informelle à base de langages informels (10) :

- La facilité de compréhension du langage informel, qui permet des consensus entre les personnes qui spécifient et celles qui commandent un logiciel.
- Le langage informel représente une manière familière de communication entre les personnes.

Par contre, l'utilisation d'un langage informel rend la modélisation imprécise et parfois ambiguë. Toute tentative de standardisation est difficile, vu le caractère informel de cette approche. Néanmoins, il est possible d'utiliser une modélisation informelle plus ou moins standardisée pour restreindre ce problème, c'est-à-dire une modélisation qui utilise un langage naturel tout en introduisant des règles d'utilisation de ce langage dans la construction de la modélisation. Un tel type de modélisation garde les avantages de la modélisation informelle en la rendant moins imprécise et moins ambiguë (10)

### 2.3.2 Modélisation semi-formelle

Le processus de modélisation semi-formelle est basé sur un langage textuel ou graphique pour lequel une syntaxe précise est définie. Ce type de modélisation permet d'effectuer des contrôles et de réaliser des automatisations pour certaines tâches, bien que la sémantique des langages semi-formels soit souvent assez faible. Les méthodes de modélisation semi-formelles dans leur majorité, s'appuient fortement sur des langages graphiques. Cela, se justifie par l'expressivité que peut avoir un modèle graphique bien développé. Le langage textuel est utilisé normalement comme complément aux modèles graphiques.

Par ailleurs, la modélisation semi-formelle utilise fortement les langages graphiques, ceci permet la production de modèles assez faciles à interpréter. Néanmoins, les aspects sémantiques impliqués dans cette approche de modélisation souffrent d'une remarquable déficience.(11)

### **2.3.3 Modélisation formelle**

Les méthodes formelles sont basées sur des techniques mathématiques pour la spécification, le développement et la validation des systèmes. L'utilisation des méthodes formelles est importante pour assurer la sécurité des systèmes. Les études pour la création d'autres outils formels qui couvrent toute la spécification, outre les outils de preuves déjà existants, montrent l'intérêt qu'on porte à ces méthodes. Bien qu'elles ne soient pas utilisées dans tous les types de modélisation, L'application des méthodes formelles, plus que souhaitable, commence à être imposée par des sociétés dans certains cas, qui nécessitent plus de rigueur.(12)

Ces modèles doivent être adaptés à une commande en temps réel des systèmes afin d'assurer une réactivité satisfaisante.

## **2.4 Modélisation des systèmes de production**

Pour étudier un système, il est nécessaire de le modéliser (11). Dans le monde de la production il existe deux modèles distincts des systèmes de production : *discret* et *continu*. Les deux termes indiquent si la mobilité des matières durant le processus est considérée comme des entités discrètes (e.g. les industries d'automobile, les réfrigérateurs, les générateurs électriques, les ordinateurs, ...) ou bien comme un flux continu (e.g. les industries chimique, métallurgique, ...). Un modèle à flux

discrets est une représentation discrète du comportement issue de la définition des systèmes à événements discrets : l'état du système évolue selon l'occurrence d'événements. Un modèle à flux continu est une approximation continue du système physique : l'état évolue continûment par rapport au temps.

#### 2.4.1 Modèles discrets

Alors que la théorie classique des systèmes continus (y compris en temps discret) et de l'automatique s'intéresse à des systèmes obéissant essentiellement aux lois de la physique, descriptible par des équations différentielles ou aux dérivées partielles (ou leur discrétisation en temps), le vocable systèmes à événements discrets (SED) recouvre des systèmes également dynamiques, mais dont la dynamique échappe totalement à ce genre de description. En réalité, au lieu de s'intéresser au déroulement continu des phénomènes, on ne se soucie que des « débuts » et des « fins » de ces phénomènes (les événements discrets) et de leur enchaînement dynamique, logique ou temporel. Les modèles SED sont utilisés dans le domaine de la production manufacturière, la robotique, les trafics de véhicules, la logistique, les réseaux de communications, etc. (12).

La plupart des systèmes physiques cités ci-dessus présente des caractéristiques communes telles que le parallélisme, la synchronisation et la concurrence.

Les modèles SED peuvent être utilisés à différents niveaux :

**Spécification.** Avant de concevoir un système, il faut déterminer ce qu'on veut lui faire, quelle doit être sa réponse dans un certain nombre de situations-types, etc.

- **Conception.** 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 des performances.** 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 se produira le n-ème événement, etc. ?

- **Ordonnement.** L'ordonnement a pour but d'établir des politiques de pilotage des flux destinées à résoudre les problèmes posés par les phénomènes de concurrence.

Pour conclure, la théorie des systèmes à événements discrets peut être divisée actuellement en deux grandes approches (4) :

- L'approche *logique* qui ne s'intéresse qu'à l'occurrence des événements ou à l'impossibilité de cette occurrence et à la succession de ces événements, mais pas à la date précise de ces occurrences, autrement dit pas aux aspects de performance ;

Des chercheurs ont utilisé cette approche pour aborder la problématique de la commande, qui agit dans ce cas sur l'inhibition de certaines transitions d'état pour éviter les comportements non désirés.(13)

- L'approche *quantitative* qui s'adresse à l'aspect évaluation de performance voire à l'optimisation de ces performances ; dans ce contexte général, on peut distinguer par exemple les approches suivantes :

- **Les files d'attente** qui appartiennent aux modélisations probabilistes classiques. Le système est modélisé en termes de serveurs ou machines et de clients ou nombre de pièces dans un stock en attente dans des files. Les clients circulent d'une file à une autre après avoir reçu un service. Les temps de service sont aléatoires et obéissant à des lois de probabilités généralement de type exponentiel (11), ce qui n'est pas toujours le cas dans la réalité. Le fonctionnement est celui correspondant à une chaîne de Markov (processus stochastique sans mémoire). Il faut cependant considérer cette approche comme un outil d'évaluation « en moyenne » sur le long terme.(12)

- **Les réseaux de Petri** associent une représentation graphique à un formalisme mathématique. Cet outil a été introduit en 1965 par C. A. Petri afin de modéliser les phénomènes de synchronisation et de concurrence. Les machines d'un système de production peuvent être modélisées par des transitions dont on étudie le franchissement. Les stocks sont représentés par des places dont le marquage correspond au nombre de pièces dans le

stock.(3)

### **2.4.2 Modèles continus**

Ils permettent une représentation mathématique sous forme d'équations différentielles ou aux dérivées partielles du système physique étudié. Mais certaines notions présentées lors de la modélisation par événements sont perdues comme la notion de conflit lorsqu'une ressource est demandée par plusieurs utilisateurs. Dans le cas continu, les pièces qui transitent dans le système sont considérées comme un flux continu et non plus pièce par pièce. Ce modèle est une approximation du cas discret qui est valable lorsque le nombre de pièces est important.

### **2.4.3 Modèles à flux continus :**

Bien que les modèles à flux continus permettent de réduire la complexité inhérente à la modélisation traditionnelle des pièces discrètes, les modèles à flux continus existants négligent certaines caractéristiques importantes des systèmes de production tels que les délais de production et les délais de transport. Beaucoup de processus de production ont un retard significatif dans le flux des matières, tel que les retards qui se produisent dans des processus de diffusion de semi-conducteur, dans des processus de séchage et de contrôle. Ces retards ont habituellement un grand impact sur les mesures des performances telles que le temps de réponse au client et le niveau des en-cours. Malheureusement, la majorité des modèles à flux continus ne tiennent pas compte de ces retards.(13)

## **2.5 Conclusion**

Les Réseaux de Petri sont un outil de modélisation universellement connu et reconnu pour les possibilités d'analyse, de validation et de vérification dont ils font preuve. L'exploitation de la théorie associée aux RdP permet, par la recherche des P et T invariants de répondre à de nombreux problèmes. La diversité des configurations des systèmes de production et la demande de flexibilité de ces systèmes en temps réel, nous amènent à considérer l'évolutivité possible des modèles en vue de la simulation et de la commande éventuelle.

Cet outil de modélisation est particulièrement bien adapté à la représentation des systèmes de production. Il se prête en effet à une

construction modulaire et permet, dans la globalité du modèle obtenu, de repérer tous les sous-ensembles. Ses propriétés mathématiques permettent un suivi de la conservation ou de la non conservation des propriétés individuelles de chaque sous-ensemble..

Avec cet outil de modélisation, on peut proposer également une simulation des fonctionnements. Ainsi, nous retrouvons cette dualité entre le système et son modèle, où l'élaboration du système se fait conjointement à l'observation préventive des comportements à travers le modèle. En toute logique, on doit concevoir alors le système par une série d'aller-retour entre le système en construction et son modèle en simulation.

# **CHAPITRE 2**

## **LES RÉSEAUX DE PÉTRI**

## 2. Les réseaux de pétri

### 2.1-Introduction

Les ateliers de production, de plus en plus complexes grâce à leur degré d'automatisation et leur grande flexibilité, doivent assurer la continuité de leur service et la qualité de leur produit. Cette performance globale d'un système de production est le résultat d'une interaction complexe des différents services : production, stock, manipulation, approvisionnement, etc. Cette complexité nécessite de représenter le système industriel sous forme de modèle, afin de mieux apprécier le comportement de l'atelier dans ses différentes simulations.

Pour comprendre un système réel que l'on ne peut pas observer ou expérimenter directement, parce que c'est un prototype ou parce que cela est trop difficile à manipuler, il faut avoir une représentation adéquate du système lui même. Ceci revient à développer un modèle fiable et qui se rapproche le plus possible de la réalité. Parmi les nombreux outils utilisés dans la modélisation, la spécification et l'évaluation du comportement dynamique des processus industriels ; les réseaux de Petri (RdP) sont largement utilisés, dans ce domaine et donnent une très bonne approche avec des résultats satisfaisants. Parmi ces résultats on peut citer quelques travaux dans les systèmes de production utilisant les RdP.(14)

Parmi les champs d'application des RdP, on peut citer:

- L'évaluation des performances de systèmes discrets,
- Les protocoles de communication,
- La commande des ateliers de fabrication,
- La conception de logiciels temps-réel,
- Les systèmes d'information,
- Les interfaces Homme-Machine,

## **2.2-La modélisation par les réseaux de Pétri :**

Un réseau de Pétri est un outil graphique et mathématique pour la modélisation du comportement des systèmes dynamiques à événements discrets et la description des relations existantes entre des conditions et des événements.

Les RDPs permettent d'analyser et de simuler des systèmes. En étant rôle d'outil graphique, il nous aide à comprendre facilement le système modélisé, en plus il nous permet de simuler les activités dynamiques et concurrentes. Avec l'outil mathématique, il nous permet d'analyser le système grâce aux modèles de graphes, aux équations algébriques, etc.

Le RDP provient de la thèse de doctorat, réalisé en 1962, du mathématicien allemand Carl Adam Pétri. Dans sa thèse, C.A.Pétri définit une nouvelle méthode d'étude de système qui se compose en 3 étapes : (14)

- On écrit le système en terme de réseau et on obtient le modèle de réseau de Pétri.

On analyse le modèle obtenu, on déduit les propriétés comme l'absence de blocages, conflits etc...

- Finalement, on fait la révision des propriétés pour montrer si le système est correct.

## **2.3-Définitions fondamentales:**

### **2.3.1-Définition informelle:**

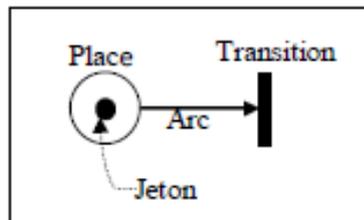
Informellement, le réseau est un graphe biparti ayant deux types de nœuds :

- Les places ( $P_i$ ) qui représentent les états du système modélisé ,elles sont représentées par des cercles.

- Les transitions( $T_i$ ) qui représentent les événements ou les actions qui causent le changement de l'état, elles sont représentées par des rectangles.

Les places et les transitions sont reliées par des arcs évalués. Il n'y a pas d'arcs entre places ni entre transitions. La valeur 1 étant omise et l'absence d'arcs indiquant la valeur 0.

Un réseau de Petri est un graphe muni d'une sémantique opérationnelle ,c'est-a-dire un comportement associe au graphe, ce qui permet de décrire la dynamique du système représenté. Pour cela les jetons sont ajoutés aux places. Ces jetons sont représentés soit par des points, soit par des nombres a l'intérieure des places. Une répartition des jetons dans les places a un instant donne est appelée marquage du réseau de Petri .(15)



**Figure 2.1: Rdp (place ,transition ,arc ,jeton)**

### 2.3.2-Définition formelle:

Définition Formellement, un réseau de Petri (R) est un quadruple

$R = (P, T, W, M_0)$  tel que : .(15)

P : est un ensemble fini et non vide de places.

T : est un ensemble fini et non vide de transitions.

W : matrice d'incidence.

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

### 2.3.3-Le marquage:

Le marquage d'un réseau de Petri est une opération qui consiste a assigner des jetons dans les places.

$M_0$  : est un marquage initial .

$M(p)$  est le nombre de marques (jetons) contenus dans la place  $p$ .

**Exemple de marquage initiale:**

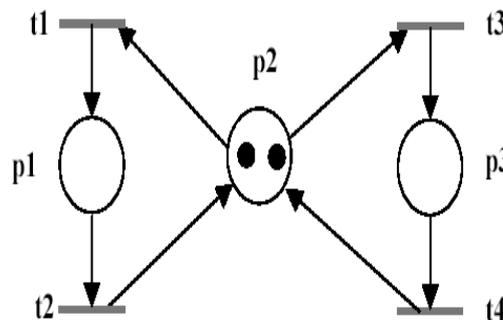
$$T = \{t1, t2, t3, t4\}$$

$$P = \{p1, p2, p3\}$$

$$\text{Arcs} = \{(p2, t1), (t1, p1), (p1, t2),$$

$$(t2, p2), (p2, t3), (t3, p3),$$

$$(p3, t4), (t4, p2) \}$$



**Figure 2.2: Exemple de marquage initial**

$$M_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

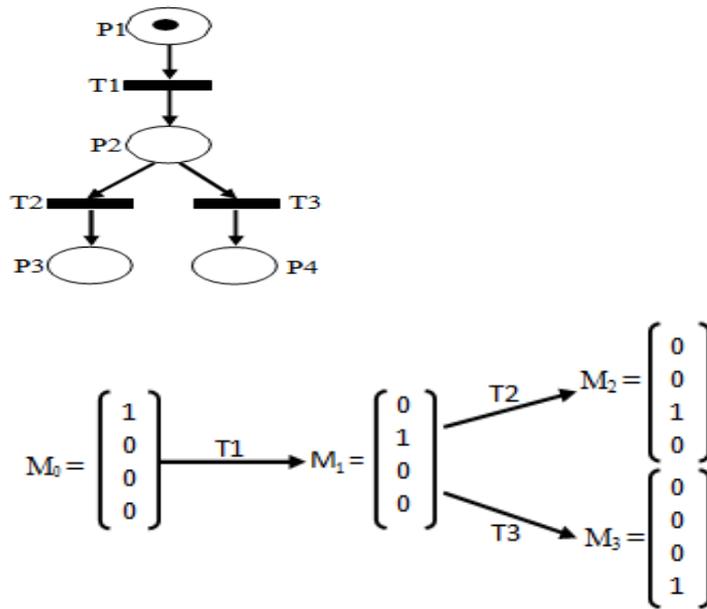
$M_0$ : Le marquage initial .

**2.3.4-Graphe des marquages accessibles :**

On appelle graphe des marquages accessibles du réseau le graphe orienté et étiqueté, qui défini par :(15)

- Un ensemble de sommets (ou de nœuds) qui représente des marquages accessibles (toutes les situations possibles du RdP au cours de son évolution à partir du marquage initial),
- Un ensemble d'arcs qui sont symbolisés par les noms des transitions franchissables faisant passer d'un marquage à l'autre pour un marquage initial  $M_0$  (c'est-à-dire : il existe un arc qui relie les nœuds).

- **Exemple :** Pour le Rdp de la figure nous obtenons le graphe suivant :



**Figure 2.3: Graphe de marquage accessible**

#### 2.4-Franchissement d'une transition:

Une transition est franchissable (ou validée) lorsque toute place  $p_i$  située en amont de  $T$  contient un nombre de jetons au moins égal au poids attaché à l'arc allant de  $p_i$  vers  $T_j$ . Dans le cas d'un RdP ordinaire, il suffit que toutes les places d'entrée d'une transition contiennent au moins un jeton pour qu'elle soit franchissable. Une transition source et donc toujours validée.(14)

Avant franchissement.

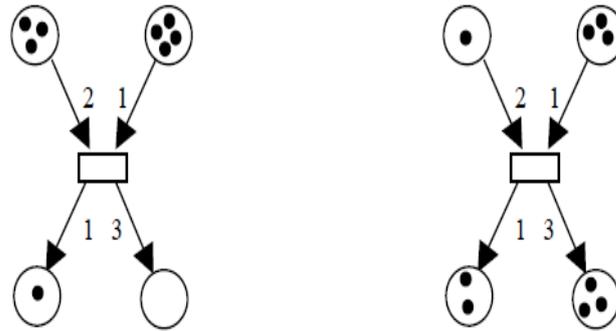


Figure 1.4 : Avant franchissement

Après franchissement

Figure 2.4 Avant et après franchissement

### 2.5-Matrice d'incidence W :

On appelle matrice d'incidence la matrice :  $W = W^+ - W^-$

C'est une matrice a n ligne et m colonnes avec n le nombre de places et m le nombre de transitions dans le RdP. Une colonne de cette matrice correspond a la modification du marquage apportée par le franchissement de la transition correspondante.

➤ **Matrice d'incidence avant (Pre):**

On appelle matrice d'incidence avant la matrice :

$$W^- = \text{Pre}(\mathbf{p_i}, \mathbf{t_j})$$

Chaque élément de cette matrice  $\text{Pre}(\mathbf{p_i}, \mathbf{t_j})$  correspond au nombre de jetons a enlever dans  $\mathbf{p_i}$  en franchissant  $\mathbf{t_j}$ .(16)

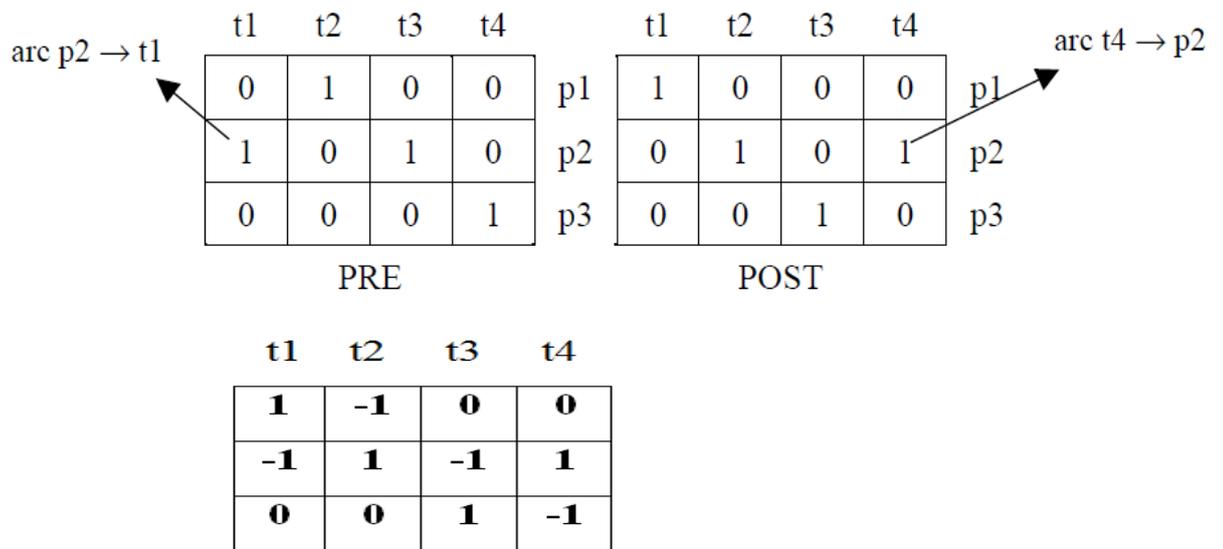
➤ **Matrice d'incidence arrière (Post):**

On appelle matrice d'incidence arrière la matrice :

$$W^+ = \text{Post}(\mathbf{t_j}, \mathbf{p_i})$$

Chaque élément de cette matrice  $\text{Post}(\mathbf{t_j}, \mathbf{p_i})$  correspond au nombre de jetons a rajouter dans  $\mathbf{p_i}$  en franchissant  $\mathbf{t_j}$ .(16)

➤ **Matrice d'incidence W de (voire figure 2.5 ):**



Matrice d'incidence de la figure

Figure 2.5: Matrices d'incidence

## 2.6-Équation caractéristique et Vecteur caractéristique:

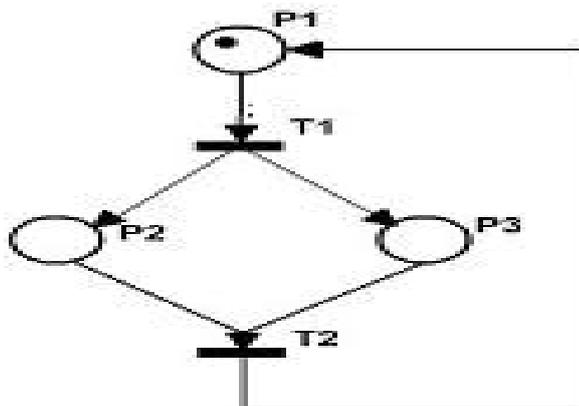
Le vecteur caractéristique  $S$  de la séquence de franchissement  $S$  est un vecteur d'entiers indexé par les transitions. La composante relative à la transition  $t$  représente le nombre d'occurrences de  $t$  dans  $S$ .

Soit  $S$  est le vecteur caractéristique correspondant à la séquence de franchissement  $S$ , alors  $M'$  peut se déduire directement de  $M$  par application de l'équation caractéristique :

$$M_{K+1} = M_K + W * s$$

Exemple :

Figure 2.6 Un réseau de petri



Le franchissement de la transition  $t_1$  conduit au marquage  $M_1 = (1,0,0)$  peut être obtenu algébriquement par la relation :(16)

$$M_1 = M_0 + W * S$$

$$M_1 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

## 2.7 Les structures particulières des réseaux de Pétri :

Les réseaux de Pétri possèdent des structures particulières dont nous allons les définir dans le tableau 2.1 :(17)

Nom du graphe	Définition	Exemple
Graphe d'état	Un RdP est un graphe d'état si et seulement si toute transition a exactement une place en entrée et une place en sortie.	
Graphe d'évènement	Un RdP est un graphe d'évènement si et seulement si toute place a exactement une transition en entrée et une transition en sortie.	
RdP à choix libre	Un RdP à choix libre est un RdP dans lequel pour tout conflit $\langle P_1, \{T_1, T_2, \dots\} \rangle$ aucune des transitions $T_1, T_2, \dots$ ne possède pas une autre place d'entrée que $P_1$ .	
RdP pur	C'est un RdP dans lequel, il n'existe pas de transition ayant une place d'entrée qui soit également une place de sortie de cette transition.	
RdP simple	C'est un RdP dans lequel chaque transition ne peut être concernée que par un conflit au plus.	

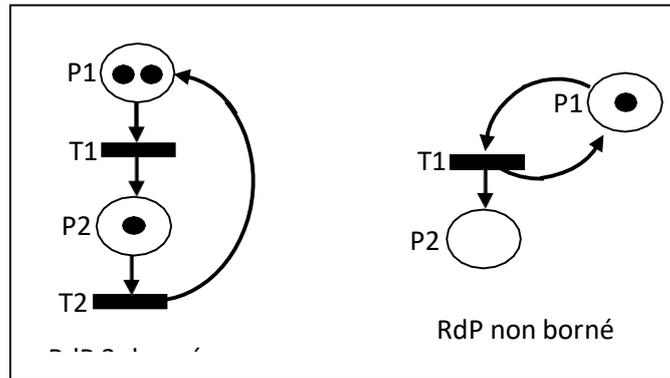
Tableau 2.1: Structure particulière du RdP

## 2.8-Les propriétés des réseaux de Pétri :

**Caractère Borné :**

Une place « p » du réseau marqué (R, M<sub>0</sub>) est k-bornée (k ∈ IN, avec k > 0) si pour tout marquage M accessible depuis M<sub>0</sub>, M(p) ≤ k (le nombre de marques dans P<sub>i</sub> est fini).

Dans le cas contraire la place « p » est dite non-bornée. .

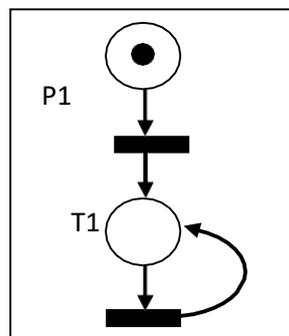


**Figure 2.7: RdP 3-borné/ non borné.**

**Activité d'un réseau de Pétri :**

**Pseudo-vivacité:**

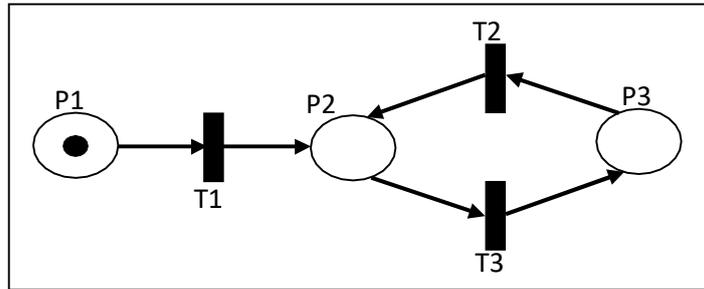
Un réseau de Pétri (R, M<sub>0</sub>) est dit pseudo-vivant si pour tout marquage accessible de puis le marquage initial M<sub>0</sub>, il existe toujours une transition « T » qui puisse être franchie. (18)



**Figure 2.8: RdP pseudo-vivant**

**Quasi-vivacité:**

La quasi-vivacité d'une transition signifie que depuis le marquage initial  $M_0$ , cette transition peut être franchie au moins une fois, sinon elle est morte. Conséquemment (inutile). Le réseau  $(R, M_0)$  est dit quasi-vivant si toutes les transitions sont quasi-vivantes. (19)

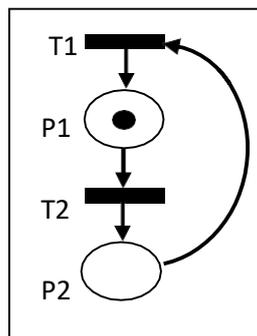


**Figure 2.9: RdP quasi-vivant.**

***Vivacité :***

La vivacité d'une transition exprime le fait que quelque soit l'évolution du réseau à partir du marquage initial, le franchissement à terme de cette transition est toujours possible. Un réseau est vivant si toutes ses transitions le sont. (14)

***Exemple :***



**Figure 2.10: RdP vivant**

***Absence de blocage :***

Cette propriété implique seulement que le réseau a toujours la

possibilité d'évoluer et de progresser.

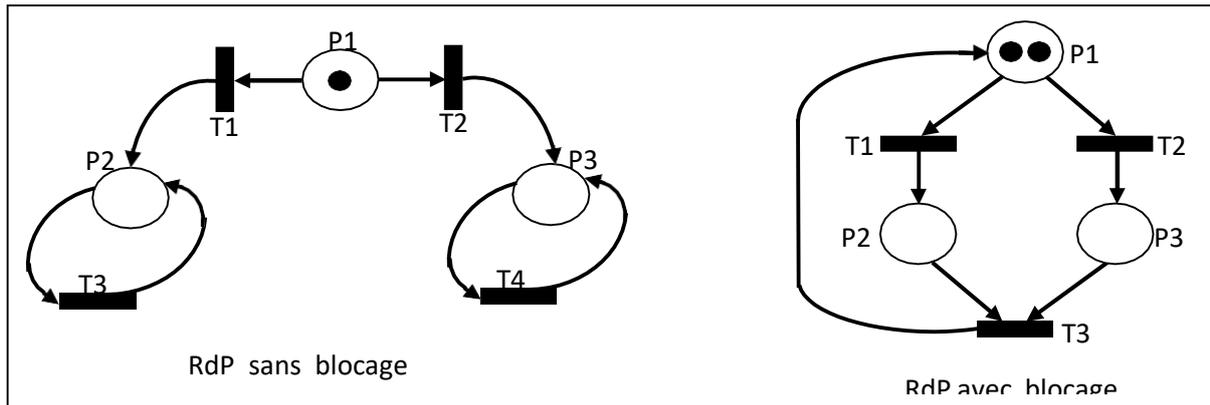


Figure 2.11: RdP sans/ avec blocage.

**Réinitialisabilité :**

Un RdP est réinitialisable si et seulement si pour tout marquage M, il existe une séquence de transitions qui permet de revenir au marquage initial  $M_0$ . (17)

**Exemple :**

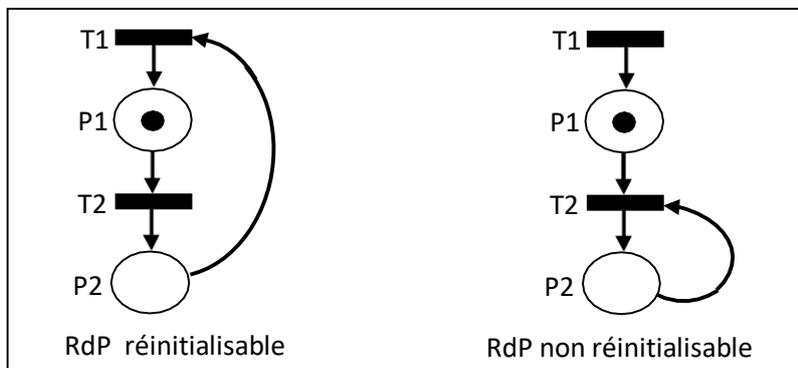


Figure 2.12: RdP réinitialisable/ non réinitialisable.

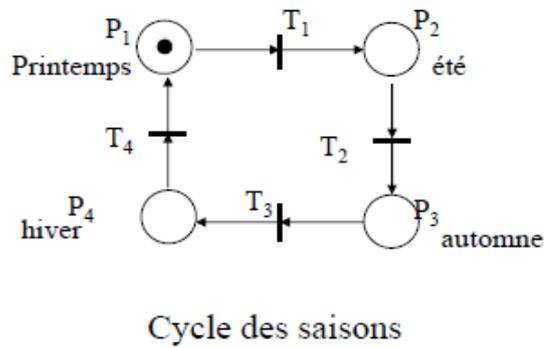
**2.9-Extensions de Réseaux de Pétri:**

**2.9-1-Réseaux de Pétri autonomes :**

Un Réseau de Pétri autonome est un réseau de Pétri qui décrit le fonctionnement d'un système qui évolue de façon autonome, c'est à dire dont les instants de franchissement ne sont pas connus, ou

pas indiqués.(15)

### RdP autonome

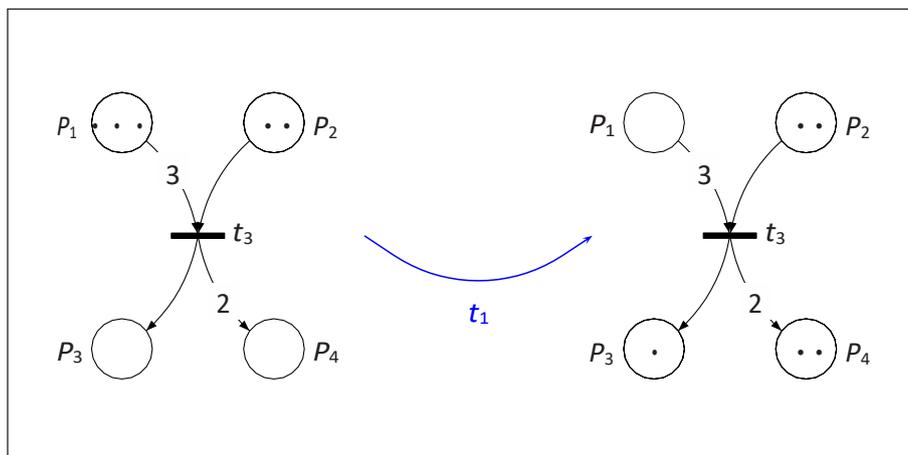


**Figure 2.13: Exemple de RdP autonome**

➤ Le RdP généralisé:

On affecte un poids, (nombre entier positif associé aux arcs). Ce poids indique le nombre de jetons consommés ou créés lors du franchissement d'une transition. On retrouve ces poids dans la matrice d'incidence. Il s'agit d'une simplification par agrégation d'un RdP ordinaire.

La pondération des arcs permet, entre autres, de mettre en avant le processus de consommation de la matière.



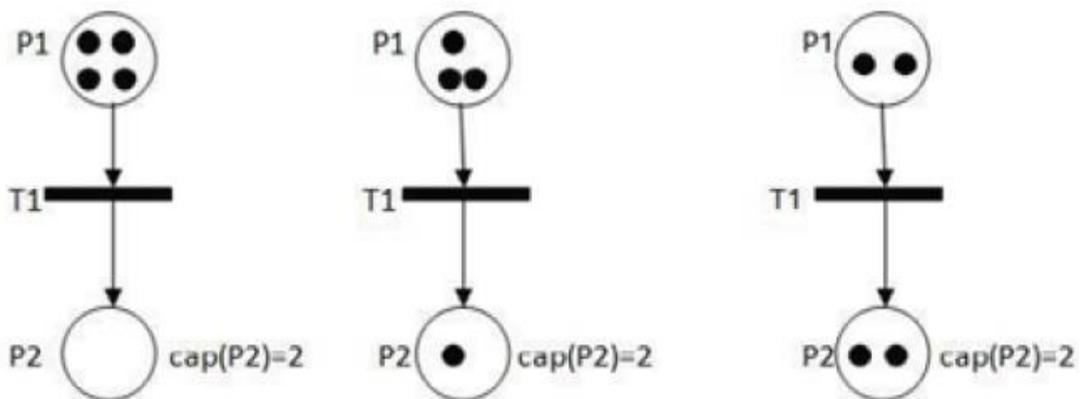
**Figure 2.14: Réseau de Pétri généralisé**

La place  $R_1$  nécessite d'avoir 3 jetons pour que  $t_1$  soit franchissable et ce franchissement produit 2 jetons dans  $P_4$

➤ **RdP a capacité**

Un RdP à capacités est un RdP dans lequel des capacités (nombre entiers strictement positifs) sont associées aux places. Le franchissement d'une transition d'entrée d'une place  $P_i$  dont la capacité est  $cap(P_i)$  n'est possible que si le franchissement ne conduit pas à un nombre de jetons dans  $P_i$  qui est plus grand que  $cap(P_i)$ .

La Figure 2.15 montre le franchissement de  $T_i$  conduit à 3 jetons dans  $P_2$  d'où  $T_1$  ne peut plus être franchie.



**FIGURE 2.15: RdP à capacité**

➤ **Le RdP à prédicats :**

Le prédicat permet d'affecter des actions de transformation sur les jetons lors du franchissement d'une transition.

Utilisé avec la coloration, le RdP à prédicat permet de mettre en évidence le processus de production et de transformation de la matière première en produit fini.

➤ **Réseaux de Pétri à arc inhibiteur**

L'arc inhibiteur permet de simplifier la représentation graphique d'un RdP. Il s'agit d'un arc orienté qui part d'une place  $P_i$  et arrive à

une transition  $T_j$ , et telle que la transition  $T_j$  est valide seulement si la place  $P_i$  est vide.

L'utilisation de cet arc permet de prendre en compte plus aisément des propriétés d'exclusions mutuelles.

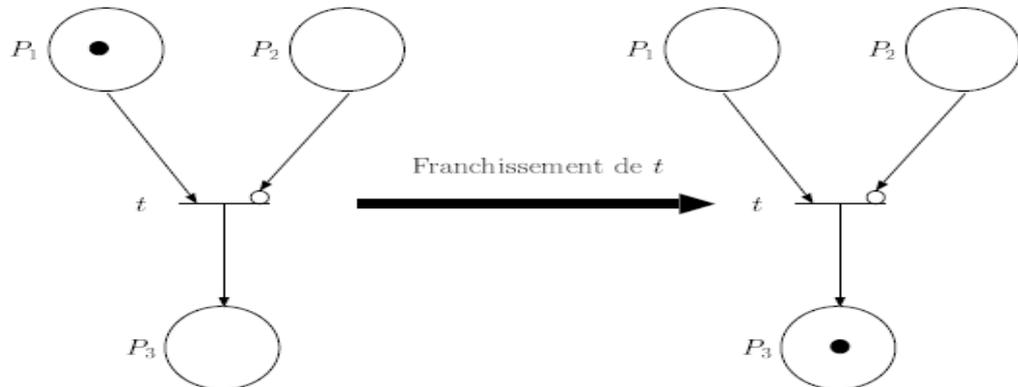


Figure 2.16: Exemple 1 de RdP à arc inhibiteur franchissable

➤ **Le RdP coloré :**

Dans un RdP coloré, les marques peuvent être différenciées par des couleurs. Si le nombre de couleurs est fini, alors on peut se ramener à un RdP classique.

Le RdP coloré est un quintuplé  $R = (P, T, Pré, Post, C)$

La coloration des jetons permet de différencier les produits circulant dans un SdP. La couleur peut être soit un attribut unique, soit un n-uplet d'attributs formant ainsi un agrégat.

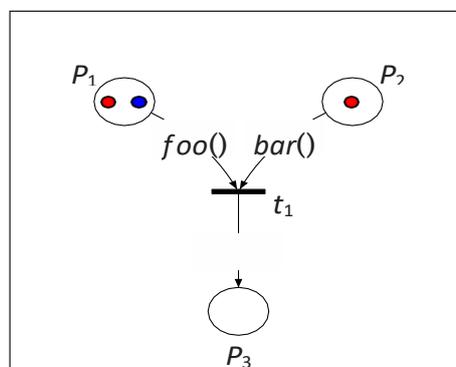


Figure 2.17: Réseau de Pétri coloré

## 2.10-Réseaux de pétri non autonomes :

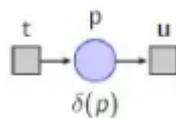
Un RdP non autonome décrit le fonctionnement d'un système dont l'évolution est conditionnée par des événements externes ou par le temps.

Il existe deux types de réseaux de Pétri non autonomes : Synchronisés et Temporisés.(15)

### ➤ Réseaux de Petri temporisés :

Un réseau de Petri temporisé permet de décrire un système dont le fonctionnement dépend du temps. Par exemple, il peut s'écouler une certaine durée entre le début d'une opération et la fin de cette opération. Si une marque dans une certaine place indique que cette opération est en cours, un RdP temporisé permettra de rendre compte de cette durée. Les réseaux de Petri temporisés sont utiles pour l'évaluation des performances d'un système. Il y a principalement deux façons de modéliser la temporisation : soit les temporisations sont associées aux places on dira que l'on a un RdP **P-temporisé**, soit les temporisations sont associées aux transitions on dira qu'on a un RdP **T-temporisé**.

### ➤ RdP P-temporisé :



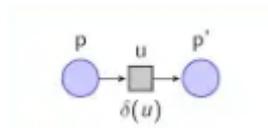
Pour chaque place  $P_i$  est associée une temporisation  $d_i$ , éventuellement nulle. Nous considérons le cas où  $d_i$  est une valeur constante, mais dans un cas général  $d_i$  pourrait être variable.(16)

### ➤ Fonctionnement

Lorsqu'une marque est déposée dans la place  $P_i$ , cette marque doit rester dans cette place au moins pendant un temps  $d_i$ . On dit

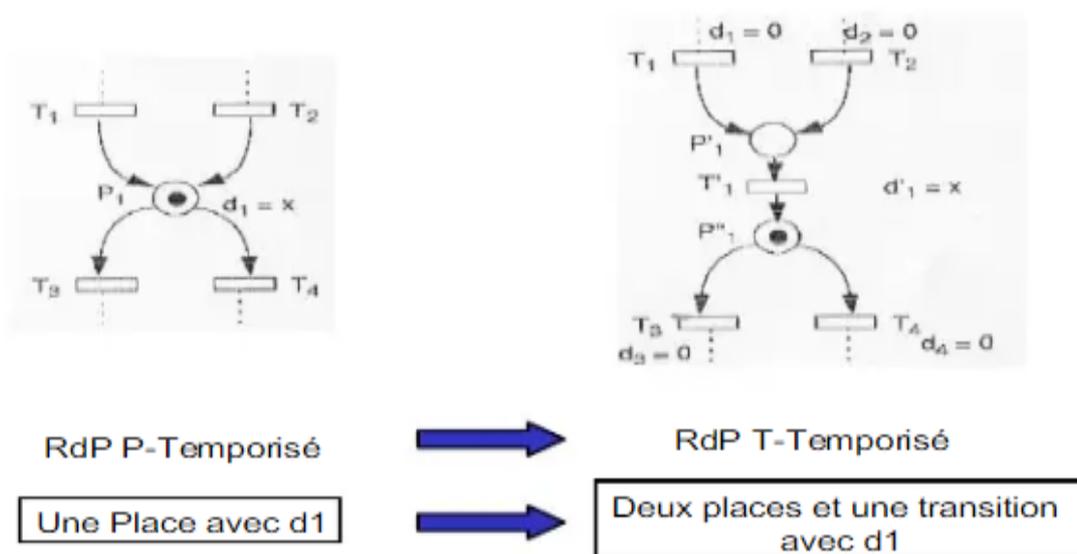
que la marque est **indisponible** pendant cette durée.

➤ **RdP T-temporisé :**



Dans les RdP T-temporisés, une durée de franchissement est affectée aux transitions.

A chaque transition  $T_j$  est associée une temporisation  $d_j$  constante. Cette particularité permet de décrire des systèmes dont le fonctionnement est dépendant du temps. Ces RdP sont utiles pour l'évaluation de performance.



**Figure 2.18:RdP P et T temporisé**

➤ **Le RdP synchronisé :**

On associe en plus des conditions de franchissement d'un RdP ordinaire (présence de marques dans les places en amont) un événement de franchissement. Ces événements sont externes au système du RdP.

**RdP P-interprété :**

Un RdP interprété est un RdP P-temporisé et synchronisé qui comporte une partie opérative. Ainsi à chaque transition  $T_j$  est

associé un événement  $E_j$  et une condition  $C_j$  de franchissement. A chaque place  $P_i$ , on associe une temporisation  $d_i$  et une opération  $O_i$ .

### **2.11-Le RdP stochastique :**

Dans un RdPS, la durée affectée n'est plus déterministe mais aléatoire. On peut grâce à cette particularité prendre en compte des événements probabilistes comme la panne d'une machine. On utilise généralement une temporisation suivant une loi exponentielle.

### **2.12-Le RdP continu:**

Dans un RdP continu le marquage des places n'est plus un nombre entier mais un nombre réel positif. Ce type de RdP permet d'analyser des performances en terme de débit. Il est fortement utile lorsque le nombre de marquages dans un RdP classique devient trop important ou pour représenter des processus continus.

Les SdP de type flux (pétrochimie, sidérurgie,...) ou de grand débit (production de masse : visserie,...) demandent une approche par les RdP continus.

### **2.13-Le RdP hybride :**

Ces RdP sont utilisés pour représenter des SdP ayant à la fois des caractéristiques discrètes et continues. Une usine de soda par exemple possède cette double approche par la matière première (fluide continu) et son conditionnement (bouteilles, canettes).

### **2.14-La méthode de modélisation par le RdP :**

- les places aux actions (ou sorties) du système(19)
- les transitions aux conditions (entrées) et/ou aux actions en

exploitant les conditions normales de sensibilisation des transitions

- les jetons aux conditions et/ou actions du système

**Conclusion:**

Le développement industriel nous force à améliorer tous les systèmes de production afin d'améliorer les produits finis ainsi que le rapport qualité/prix.

La présentation de ce chapitre nous incite à pratiquer la théorie des RdP sur un exemple réel qui consiste en une ligne de fabrication industrielles. Cette expérience avec les RdP nous permet de réaliser des graphes de Petri aussi bien à la conception du système de production ou après sa mise en exploitation afin de faire des simulations et de découvrir les problèmes

# **CHAPITRE 3**

**SIMULATION D'UN MODEL GRAPHIQUE  
A PARTIR DU RDP TEMPORISE**

## **Simulation d'un Model Graphique à partir du RdP Temporisé**

### **3.1-Introduction :**

Un F.M.S possède un environnement dynamique et compliqué qui est à l'origine de plusieurs problèmes. Notamment l'allocation, à chaque opération, des ressources requises pour la réalisation du produit.(18)

Lorsque l'on aborde le problème d'ordonnancement de fabrication, on doit considérer le caractère dynamique de son fonctionnement. En effet, les caractéristiques du problème sont dépendantes du contexte courant. Donc il est primordial de tenir compte de tous les paramètres qui interviennent au cours du temps, afin d'assurer la flexibilité et l'adaptabilité des traitements.

étant basée sur les réseaux de pétri temporisés sont basées sur l'équation d'évolution et la notion du marquage à un instant donnée.

### **3.2- Simulation du modèle de conduite :**

#### **3.2-1- Introduction :**

La simulation permet d'analyser le comportement du système spécifié et de réaliser une première vérification de la cohérence du modèle. Ainsi l'on prouvera que le comportement spécifié correspond à celui attendu. De point de vu des réseaux de pétri, un modèle peut être simulé selon deux types d'abstraction :(18)

- ◆ Le réseau de pétri est remplacé par l'équation d'évolution du marquage.
- ◆ Un système de production est généralement modélisé par un R.d.P temporisé.

#### **3.2-2- Simulation par l'équation d'évolution du marquage :**

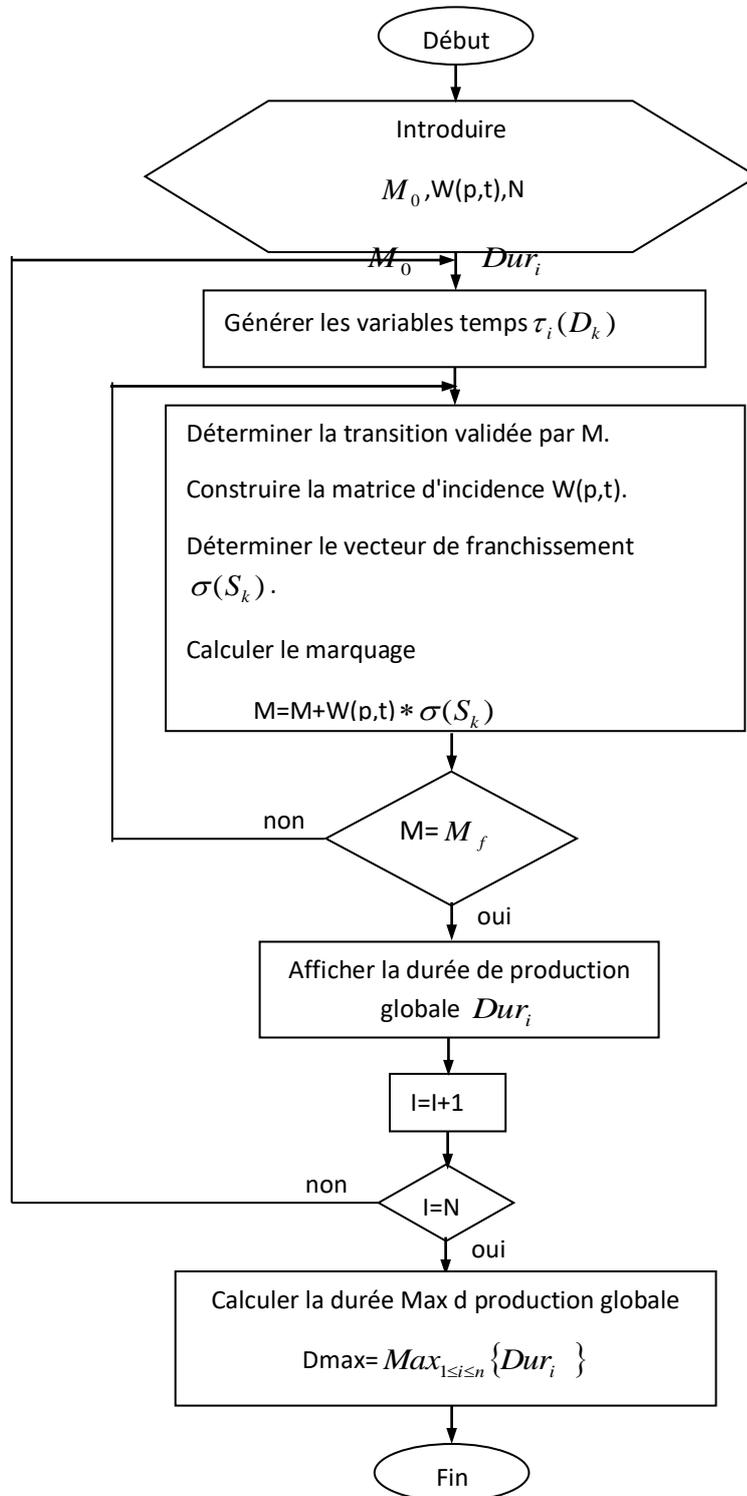
Un modèle basé sur les réseaux de pétri a l'avantage d'être exécutable. L'évolution du R.d.P depuis son marquage initial jusqu'à son marquage final simule l'évolution du système modélisé depuis son état initial jusqu'à son état final. Cette évolution est régie par l'équation fondamentale des R.d.P :(18)

$$M_{k+1} = M_k + W(p, t) * S$$

Avec  $W(p,t)$ , la matrice d'incidence globale du réseau et  $S$  est le vecteur de franchissement donné par :

$$S(j) = \begin{cases} 1 & \text{si } t_j \text{ est franchie après validation par le marquage } M \\ 0 & \text{si } t_j \text{ n'est pas franchis} \end{cases}$$

### 3.3- Algorithme de simulation :



### 3.4 -Composition de la cellule de production flexible :

Dans les systèmes industriels, les opérations appartiennent à des catégories différentes: opérations de transferts, d'usinage, et de stockage. Elles sont définies au niveau des ressources. Plusieurs opérations peuvent rendre effectif les mêmes fonctions dans une FMS (cas de ressources redondantes). Une ressource peut s'exécuter aussi sur plusieurs opérations (cas de ressources polyvalentes). Soit la cellule de production flexible pilote, développée au LAGIS (LILLE). Les ressources principales de ce processus sont trois machines appelées  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ . Elles exécutent respectivement les fonctions d'usinage :  $M_1$ ,  $M_2$ , et  $M_3$ .  $R_{14}$  est un robot qui exécute des opérations du transfert de FIFO IN à  $Z_1$ , de  $Z_1$  à FIFO OUT, de  $Z_1$  à  $Z_2$ , de  $Z_2$  à  $Z_1$ , de  $Z_1$  à  $Z_4$ , et de  $Z_4$  à  $Z_1$ .  $R_{11}$  est un robot de chargement /déchargement affecté à  $M_1$ ,  $R_{12}$  est un robot du chargement /déchargement affecté à  $M_2$ ,  $R_{13}$  est un robot de chargement /déchargement affecté à  $M_3$ . CV est un convoyeur, permettant le transfert de  $Z_1$  à  $Z_2$  ou  $Z_5$ , de  $Z_2$  ou  $Z_5$  à  $Z_3$ , de  $Z_3$  à  $Z_4$  ou  $Z_6$ , de  $Z_4$  ou  $Z_6$  à  $Z_1$ .

Le convoyeur est une ressource de transport complexe. Des chemins différents peuvent être suivis pour atteindre le même emplacement.  $R_{14}$  peut exécuter le même transfert comme le convoyeur, de  $Z_1$  à  $Z_2$ . C'est un exemple de flexibilité du transport.

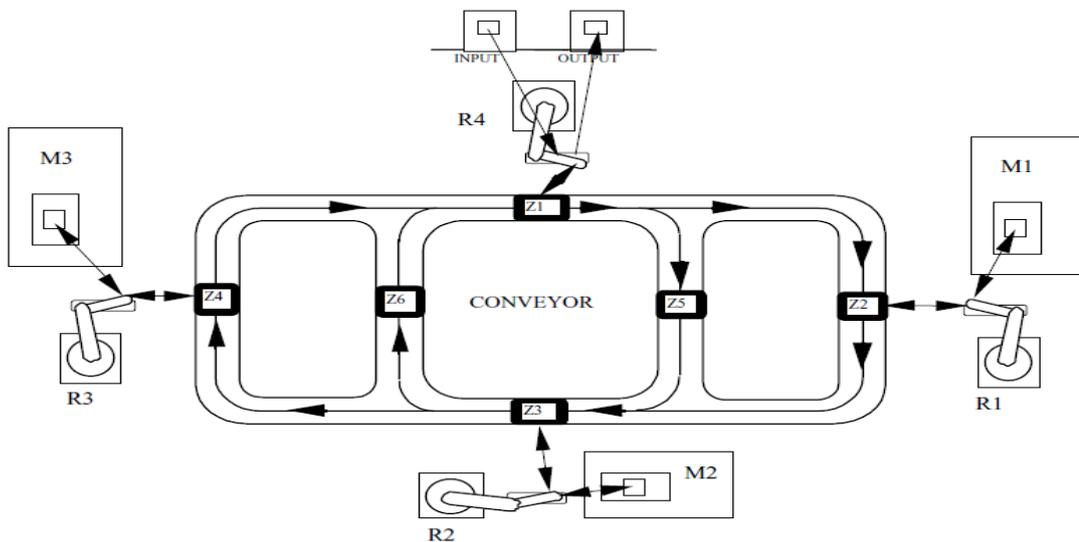


Figure 3-1- La cellule de production flexible

### 3.4.1- Plan de charges :

- **Gammes d'opérations :**

A:  $IN \Rightarrow Z_1 \Rightarrow Z_2 \Rightarrow M_1 \Rightarrow Z_2 \rightarrow Z_3 \Rightarrow M_2 \Rightarrow Z_3 \rightarrow Z_4 \Rightarrow M_3 \Rightarrow Z_4 \rightarrow Z_1 \Rightarrow OUT$

$\Rightarrow$  : La pièce est transportée par le robot R<sub>14</sub>.

$\Rightarrow$  : La pièce est transportée par le robot R<sub>11</sub>.

$\Rightarrow$  : La pièce est transportée par le robot R<sub>12</sub>.

$\Rightarrow$  : La pièce est transportée par le robot R<sub>13</sub>.

$\rightarrow$  : La pièce est transportée par le convoyeur.

$\Rightarrow$  : La pièce est transportée par le robot.

$\rightarrow$  : Le transport est effectuée autrement.

### 3.4.2- Base de données :

Opérations	durées déterministes
	A
M <sub>1</sub>	70
M <sub>2</sub>	120
M <sub>3</sub>	95
IN $\Rightarrow$ Z <sub>1</sub> / Z <sub>1</sub> $\Rightarrow$ Out	10
Z <sub>2</sub> $\Rightarrow$ M <sub>1</sub> / M <sub>1</sub> $\Rightarrow$ Z <sub>2</sub>	15
Z <sub>3</sub> $\Rightarrow$ M <sub>2</sub> / M <sub>2</sub> $\Rightarrow$ Z <sub>3</sub>	25
Z <sub>4</sub> $\Rightarrow$ M <sub>3</sub> / M <sub>3</sub> $\Rightarrow$ Z <sub>4</sub>	30
Z <sub>1</sub> $\Rightarrow$ Z <sub>2</sub> / Z <sub>2</sub> $\Rightarrow$ Z <sub>1</sub>	10
Z <sub>1</sub> $\Rightarrow$ Z <sub>4</sub> / Z <sub>4</sub> $\Rightarrow$ Z <sub>1</sub>	15
Z <sub>1</sub> $\rightarrow$ Z <sub>2</sub> / Z <sub>2</sub> $\rightarrow$ Z <sub>3</sub> / Z <sub>3</sub> $\rightarrow$ Z <sub>4</sub> / Z <sub>4</sub> $\rightarrow$ Z <sub>1</sub>	3
Z <sub>1</sub> $\rightarrow$ Z <sub>5</sub> / Z <sub>5</sub> $\rightarrow$ Z <sub>3</sub> / Z <sub>3</sub> $\rightarrow$ Z <sub>6</sub> / Z <sub>6</sub> $\rightarrow$ Z <sub>1</sub>	1

### **3.5- Conduite du système de production flexible :**

#### **3.5.1- Problématique :**

Le type de système étudié est un système de production flexible composé d'un ensemble de machines de capacité unitaire. (Exécute une opération à la fois).

Le produit est défini par un ensemble d'opérations, qui peuvent être exécutées par différentes machines. Le temps requis par opération peut être différent d'une machine à une autre. Les stocks d'entrées et de sortie ont des capacités infinies. Il existe des contraintes de précedence dans un même produit .

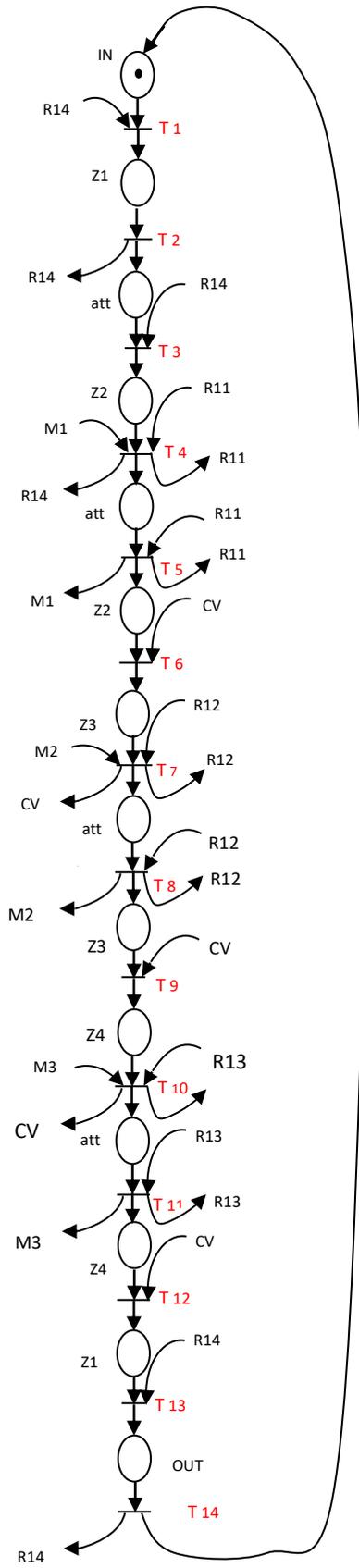
Notre probleme est de réaliser la visualisation et la modelisation de la cellule de production rcelle par la réalisation des pièces definis de production en introduisant les temps de réalisation de la gamme de production.

#### **3.5-2-Modélisation à base des RdP**

On a modélisé les gammes avec les Rdp -Temporise on a associé les places à des actions et les temps au transition ,ensuite on va donner un exemple sur le calcul des marquages en utilisant l'équation fondamentale suivante :

$$M_{k+1} = M_k + W(p, t) * S$$

$$S_k = W^- * M0$$



Gamme A



$$S_0 = W^{-1} * M_0 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} t1 & t2 & t3 & t4 & t5 & t6 & t7 & t8 & t9 & t10 & t11 & t12 & t13 & t14 \end{matrix} \\ \begin{matrix} P1 \\ P2 \\ P3 \\ P4 \\ P5 \\ P6 \\ P7 \\ P8 \\ P9 \\ P10 \end{matrix} & \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

$$M_1 = M_0 + W * S_0 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

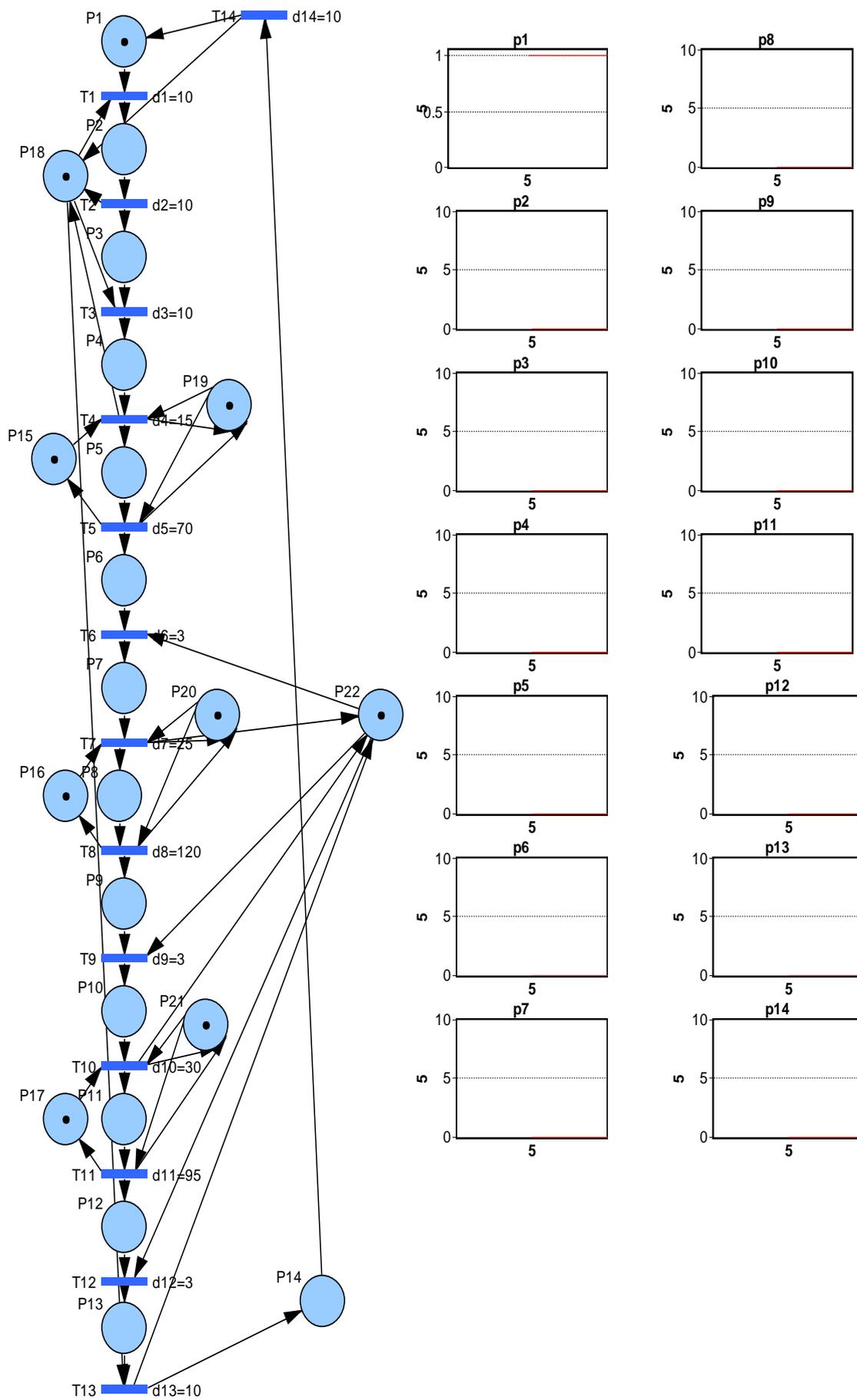
### 3.6-Simulation :

Dans notre étude de cas de l'atelier nous avons utiliser le "logiciel d'aide à l'évaluation des performances des systèmes de production modélisés par les réseaux de Petri "Sirphyco" .

Le logiciel SIRPHYCO a pour objectif de simuler le fonctionnement de réseaux de Petri continus et hybrides qui ont été définis au Laboratoire d'Automatique de Grenoble (France). Il permet aussi de simuler des réseaux de Petri temporisés discrets.

**Tableau 3.1: de numérotation des place de Rdp en Sirphyco:**

<b>Place en Rdp</b>	<b>Place en Sirphyco</b>
IN	P1
Z1	P2
Att	P3
Z2	P4
Att dis M1	P5
Z2	P6
Z3	P7
Att dis M2	P8
Z3	P9
Z4	P10
Att dis M3	P11
Z4	P12
Z1	P13
Out	P14
M1	P15
M2	P16
M3	P17
R14	P18
R11	P19
R12	P20
R13	P21
CV	P22



, figure 3-2- Réseau de pétri en Sirphyco

Dans la figure (3-2) nous avons représenté le réseau de pétri à et nous avons ajouté le temps en les transition T et pris le graphique des place suivant (P1,P2,P3,P4,P5,P6,P7,P8,P9,P10,P11,P12,P13,P14) , en suit nous faisons la simulation de la modèle de production a partir de franchissement de transition T1 en suite T2 ..... jusque a T'14 pour terminé un cycle de production et en trouve les graphe suivent :

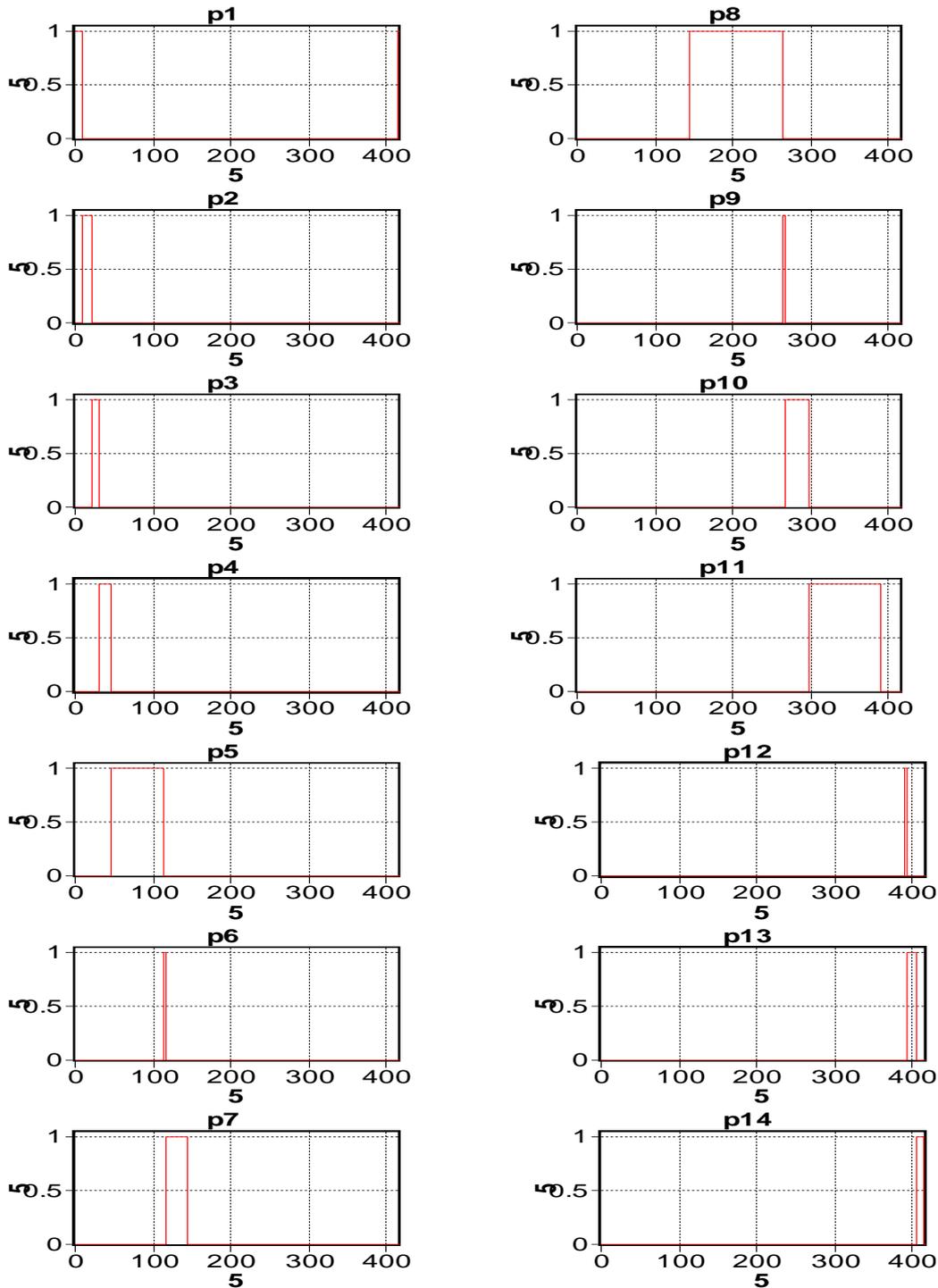


Figure 3-3-Les graphe de temps de place

A partir la simulation en visualise le déplacement de jeton on passe de p1 à P2 ..... jusqu'à la fin du cycle , et en voit comment fonctionnent les machines M1,M2 ,M3, R14,R11,R12, R13, et le convoyeur CV .

La figure(3-3) représenté les graphe de temps a chaque place et présente le temps de fabrication et le temps consomme par le jeton pour déplace de P1 vers P2 ..... jusqu'a la fin de cycle .

La figure de place P14 représente le temps consomme pour faire une seul cycle de fabrication .

**-Tableau 3.2: de temps de fabrication :**

A partir la figure (3-3) en mesure le temps de fabrication pour N cycle :

N cycle	1	5	10	15	20
Temps (minutes)	414	2070	4140	62010	80280

N cycle : nombre de cycle .

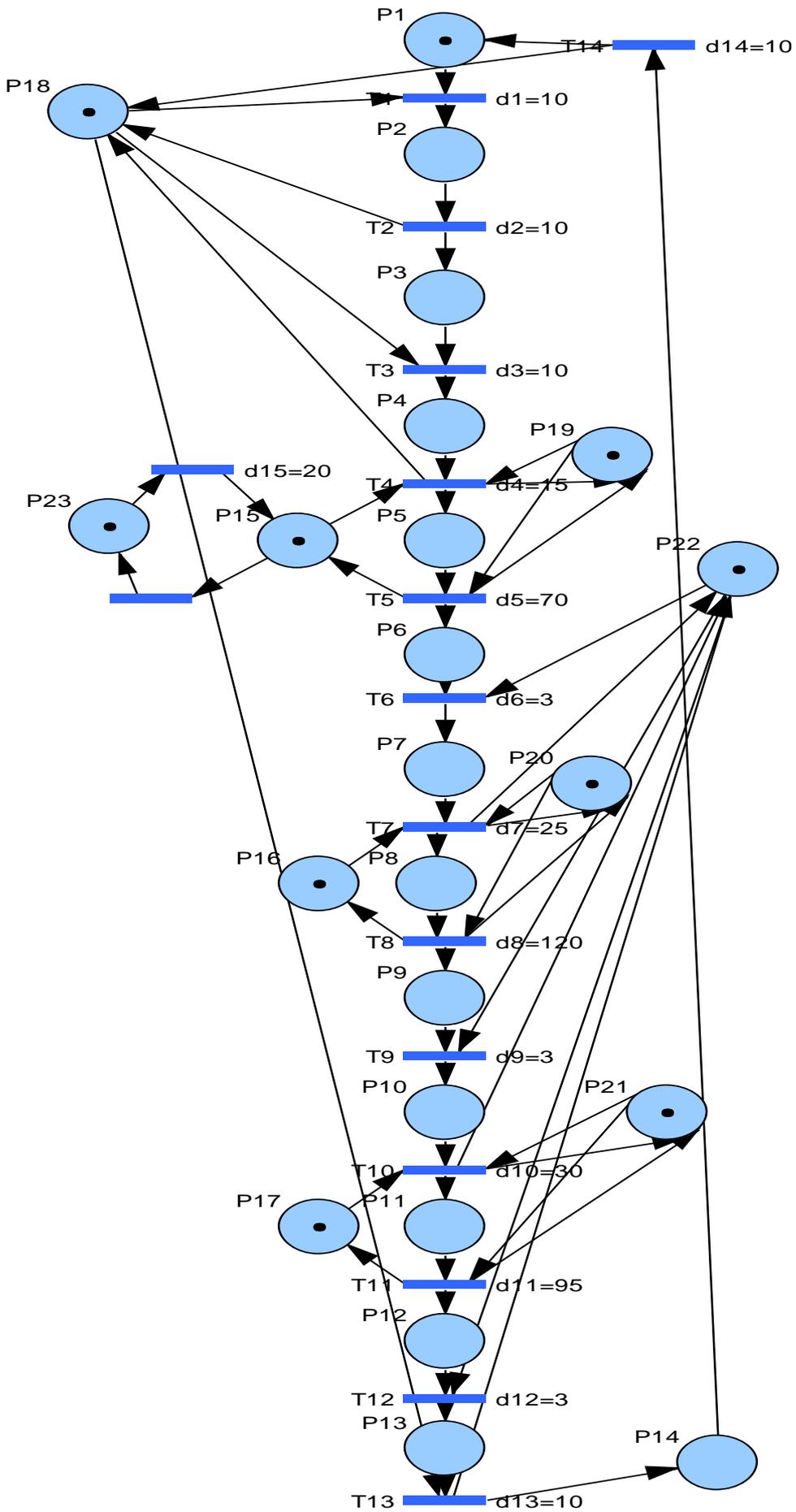
**3-7-Procédure de dépannage :**

Dans cette procédure en étude le panne de machine M1 , M2 , M3 .

**3-7-1-Dépannage M1 :**

Si la machine M1 et en panne le temps de réparation est 20 minute .

En réalise le Rdp de dépannage de M1 en sirphyco :



Dans la figure (3-4) en présente le réseau de pétri de dépannage de M1 et en ajoute le temps de réparation de la machine M1, et en faire la simulation et en trouve les figure suivent :

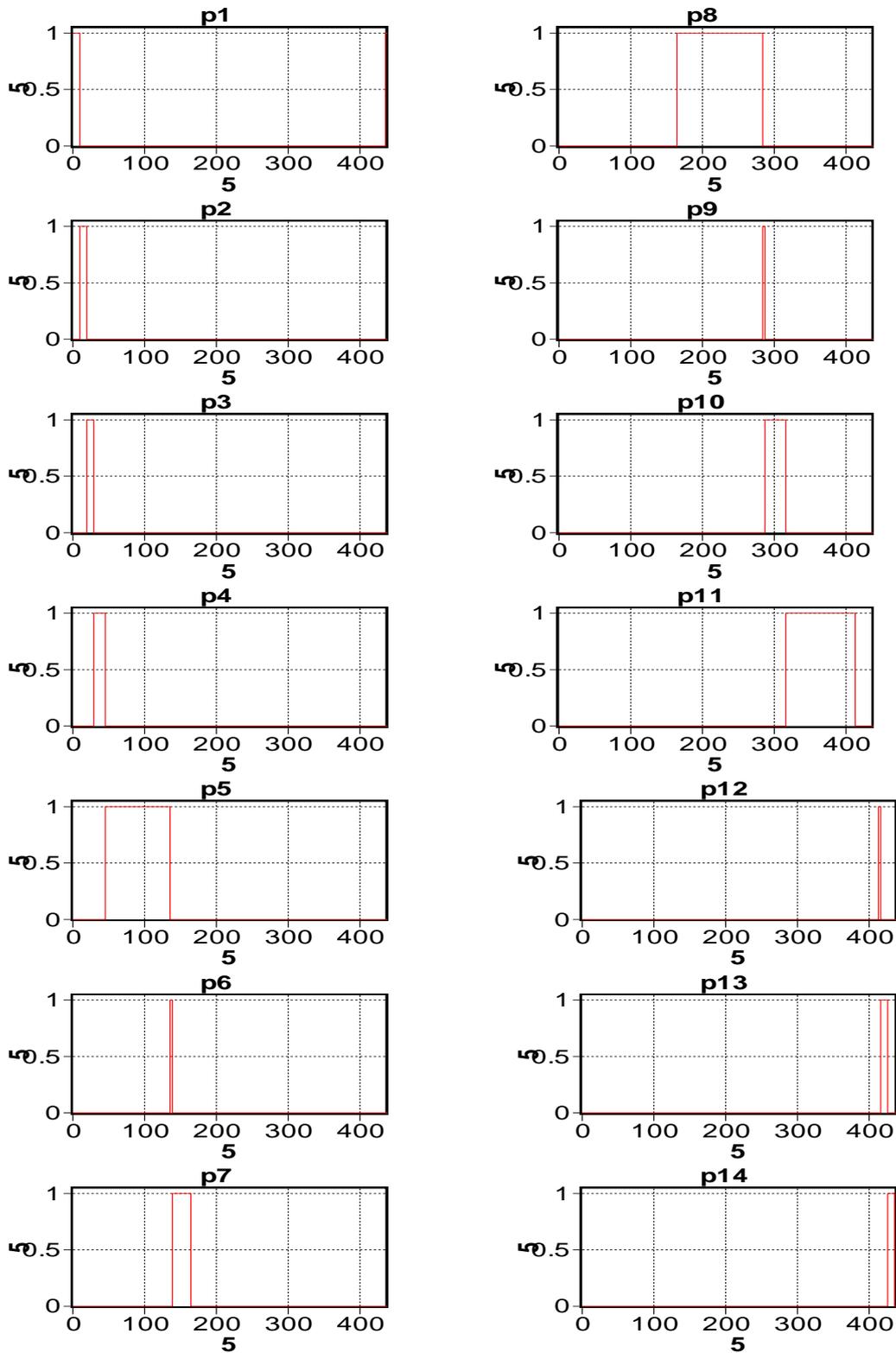


Figure 3-5: les graphes de temps avec dépannage de M1

A partir la simulation en visualise en sirphyco le déplacement de jeton on passe de p1 à P2 ..... jusqu'à la fin du cycle ,et en visualise le dépannage de M1 , et en voit comment fonctionnent les machines M1,M2 ,M3, R14,R11,R12, R13, et le convoyeur CV .

La figure(3-5) représenté les graphe de temps a chaque place et présente le temps de fabrication et le temps consomme par le jeton pour déplace de P1 vers P2 ..... jusqu'a la fin de cycle .

La figure de place P5 représenté le temps de dépannage .

La figure de place P14 représente le temps consomme pour faire une seul cycle de fabrication ,et en remarque que le temps de fabrication augmenté .

**-Tableau 3.3: de temps de fabrication :**

A partir la figure (3-5) en mesure le temps de fabrication pour N cycle :

N cycle	1	5	10	15	20
Temps	434	2170	4340	6510	8680

A partir le tableau en remarque que le tempe de fabrication en dépannage augmenté par a port le fabrication normale .

**3-7-2-Dépannage M2 :**

Si la machine M2et en panne le temps de réparation est 10 minute .

En réalise le Rdp de dépannage de M2 en sirphyco :

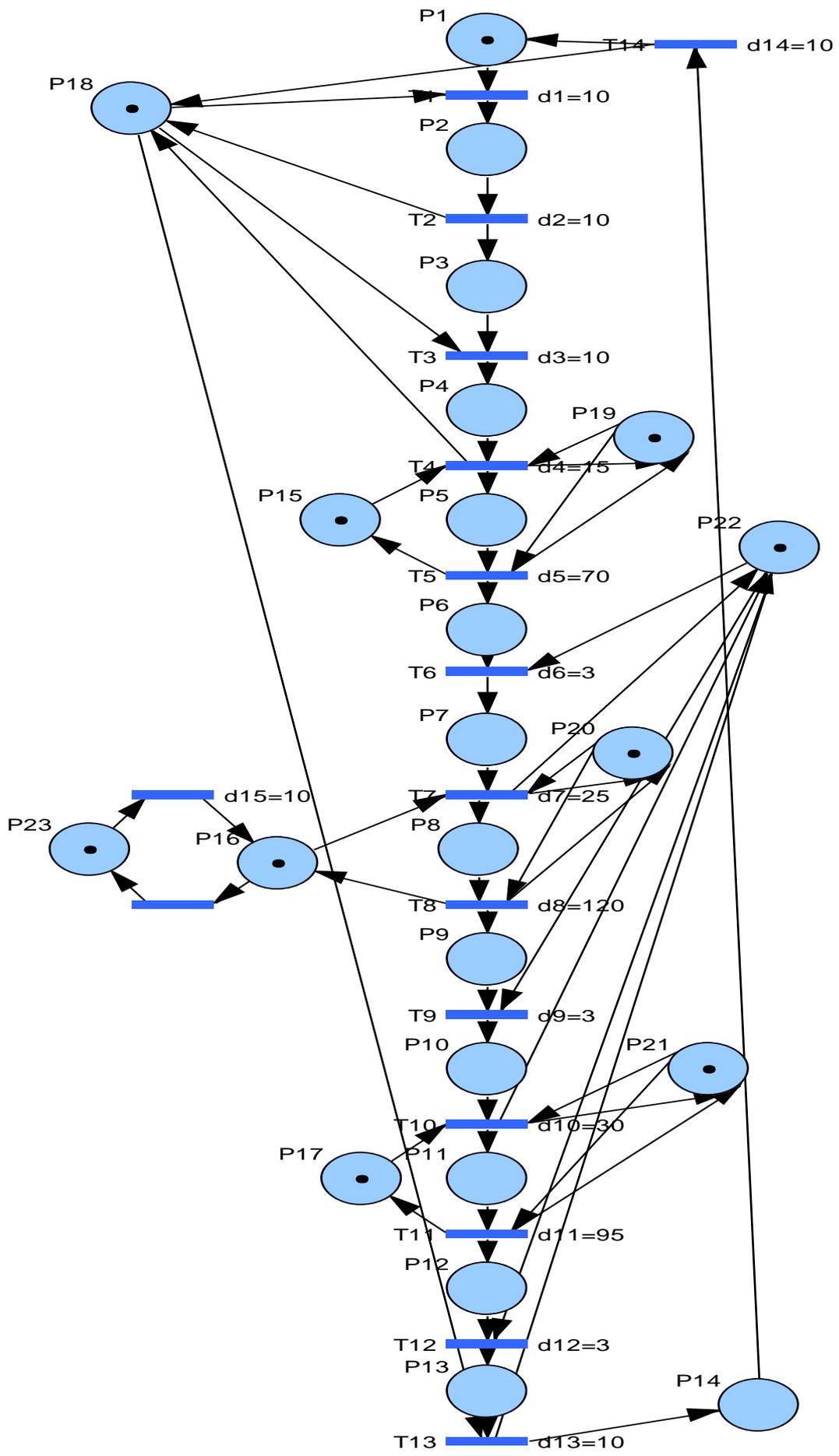
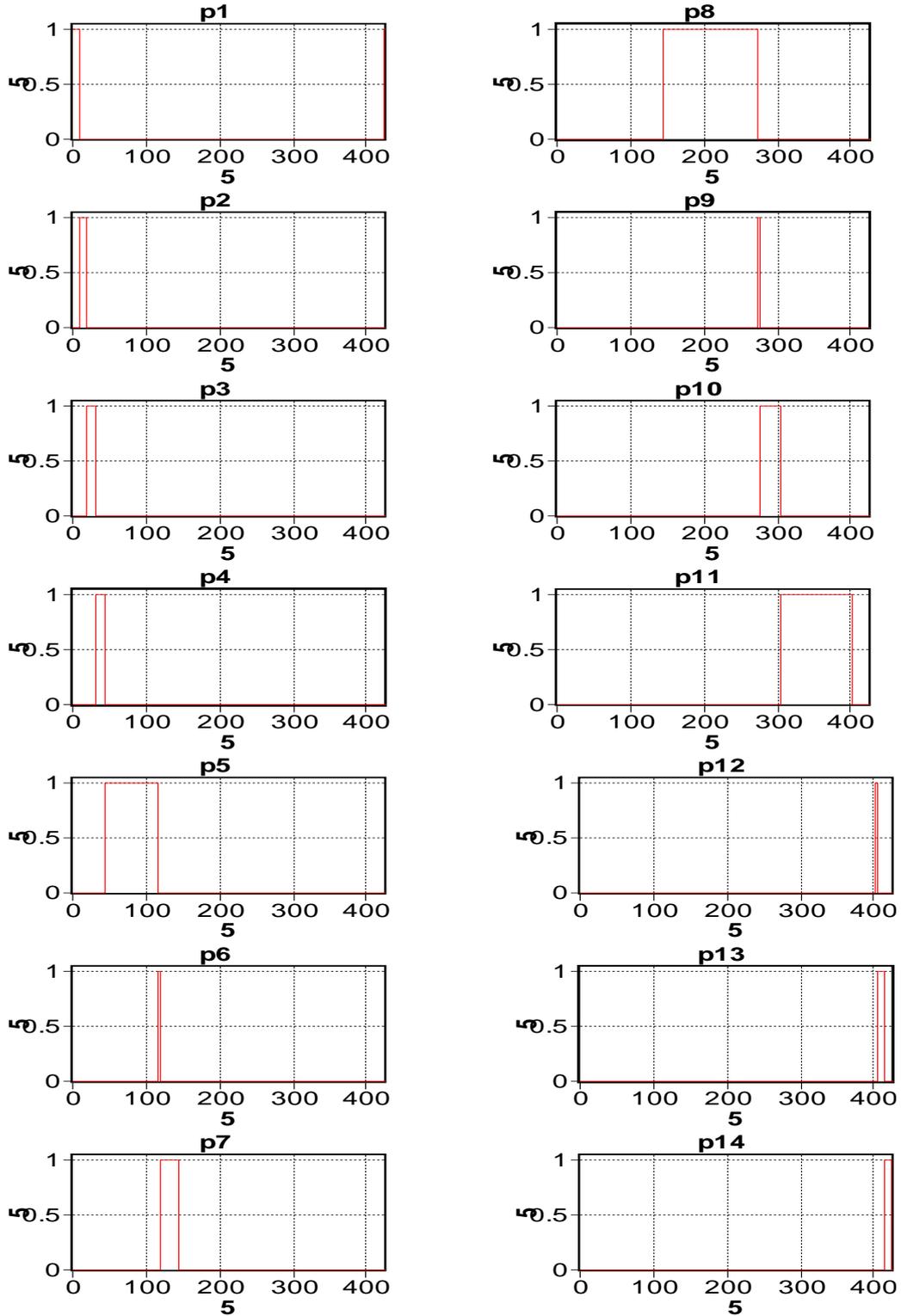


Figure 3-6 RdP de dépannage de M2

Dans la figure (3-6) en présente le réseau de pétri de dépannage de M2et en ajoute le temps de réparation de la machine M2, et en faire la simulation et en trouve les figure suivent :



A partir la simulation en visualise en sirphyco le déplacement de jeton on passe de p1 à P2 ..... jusqu'à la fin du cycle ,et en visualise le dépannage de M2 , et en voit comment fonctionnent les machines M1,M2 ,M3, R14,R11,R12, R13, et le convoyeur CV .

La figure(3-7) représenté les graphe de temps a chaque place et présente le temps de fabrication et le temps consomme par le jeton pour déplace de P1 vers P2 ..... jusqu'a la fin de cycle .

La figure de place P8 représenté le temps de dépannage .

La figure de place P14 représente le temps consomme pour faire une seul cycle de fabrication ,et en remarque que le temps de fabrication augmenté .

**-Tableau 3.4 : de temps de fabrication :**

A partir la figure (3-7) en mesure le temps de fabrication pour N cycle :

N cycle	1	5	10	15	20
Temps	424	2120	4240	6360	8480

A partir le tableau en remarque que le tempe de fabrication en dépannage augmenté par a port le fabrication normale .

**3-7-3-Dépannage M3 :**

Si la machine M3et en panne le temps de réparation est 15 minute .

On réalise le Rdp de dépannage de M3 en sirphyco :

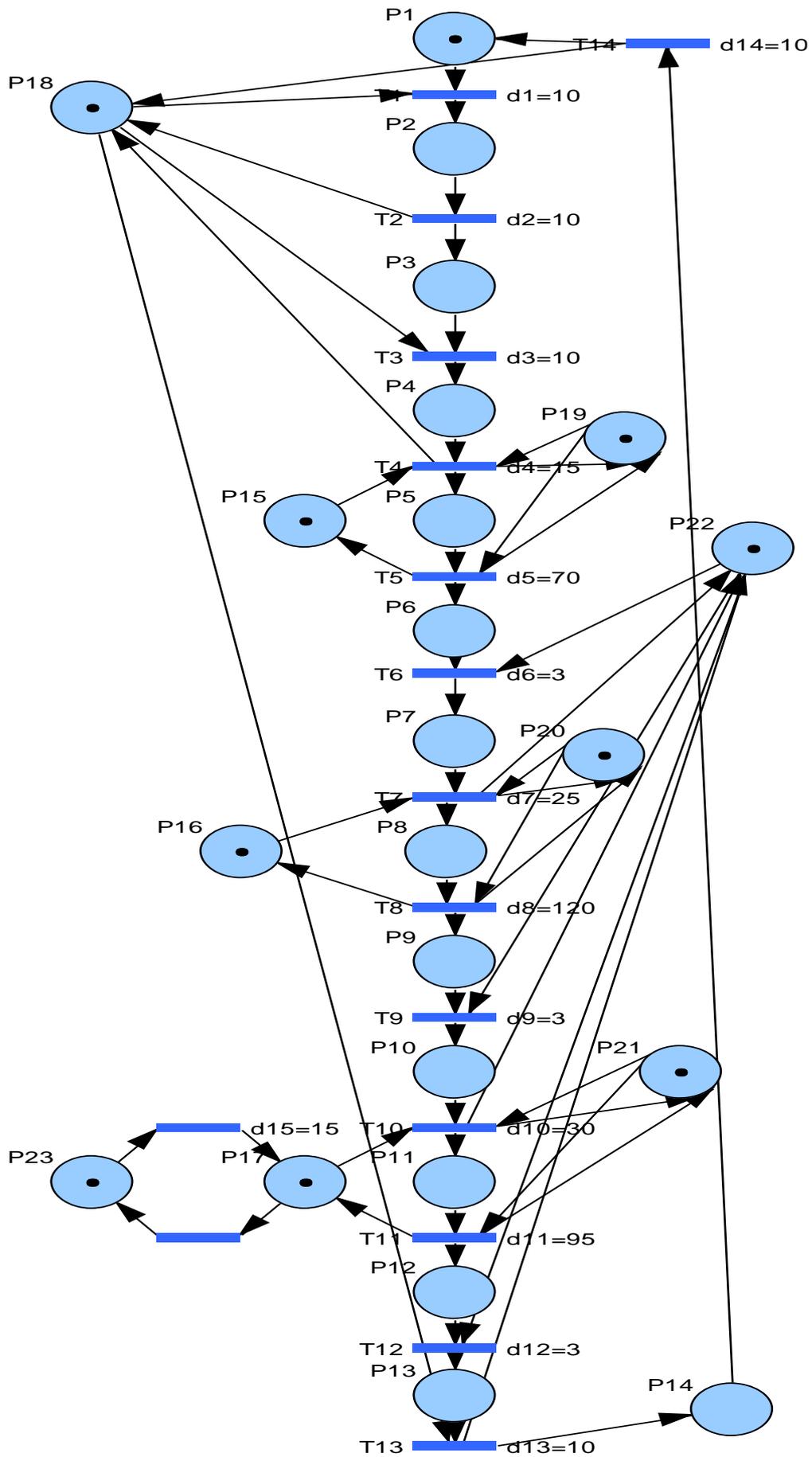


Figure 3-8: RdP de dépannage de M3

Dans la figure (3-8) en présente le réseau de pétri de dépannage de M3et en ajoute le temps de réparation de la machine M3, et en faire la simulation et en trouve les figure suivent :

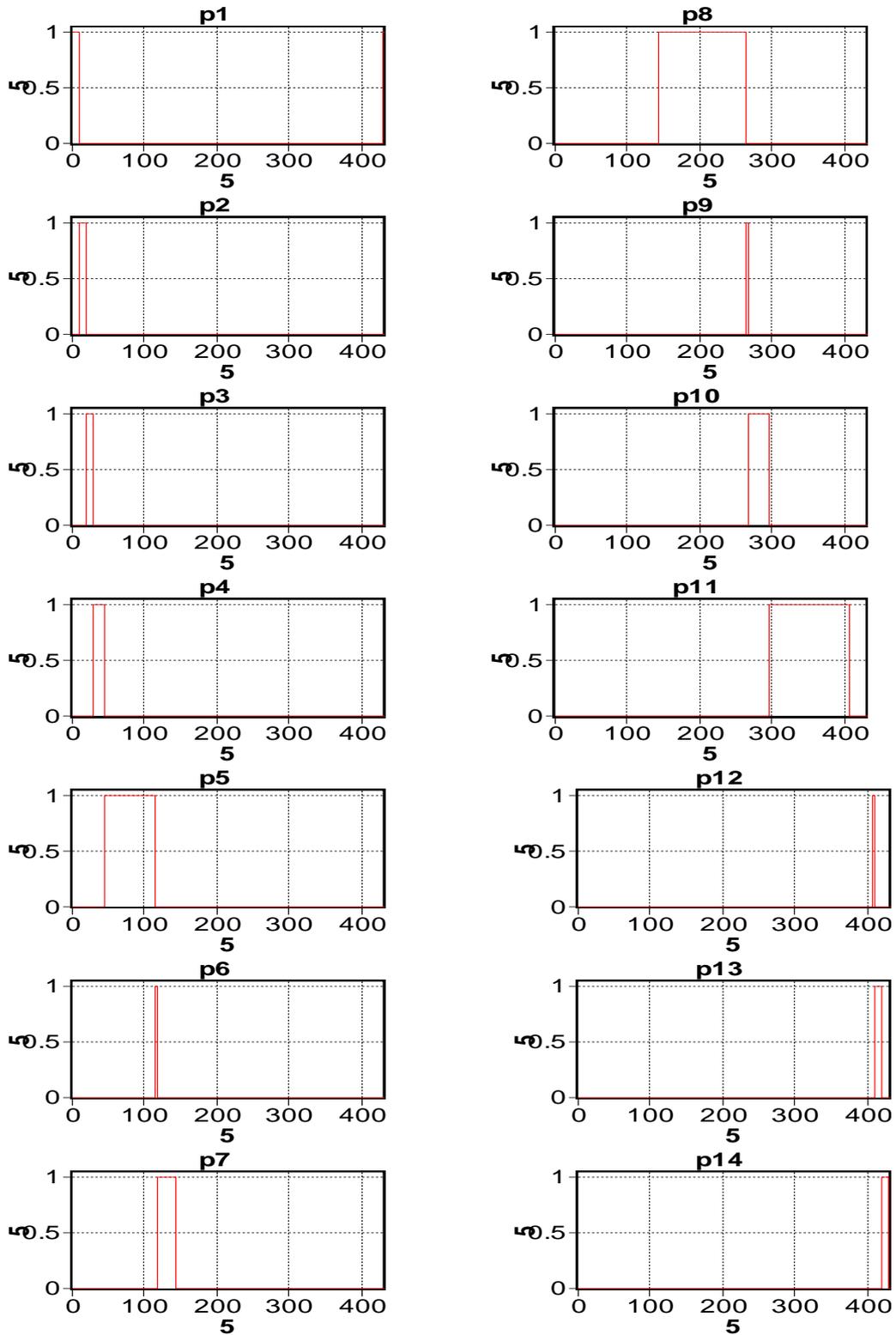


Figure 3-9: les graphe de temps avec dépannage de M3

A partir la simulation en visualise en sirphyco le déplacement de jeton on passe de p1 à P2 ..... jusqu'à la fin du cycle ,et en visualise le dépannage de M3 , et en voit comment fonctionnent les machines M1,M2 ,M3, R14,R11,R12, R13, et le convoyeur CV .

La figure(3-9) représenté les graphe de temps a chaque place et présente le temps de fabrication et le temps consomme par le jeton pour déplace de P1 vers P2 ..... jusqu'a la fin de cycle .

La figure de place P11 représenté le temps de dépannage .

La figure de place P14 représente le temps consomme pour faire une seul cycle de fabrication ,et en remarque que le temps de fabrication augmenté .

**-Tableau 3.5: de temps de fabrication :**

A partier la figure (3-9) en mesure le temps de fabrication pour N cycle :

N cycle	1	5	10	15	20
Temps	429	2145	4290	6435	8580

A partier le tableau en remarque que le temps de fabrication en dépannage augmenté par a port le fabrication normal .

**3.8 Conclusion :**

Dans ce chapitre en fait la modélisation d'un systeme de production par le RdP et utilise le sirphyco pour vusioalise comment fonctionne

## Conclusion générale

A travers ce travail on voit que les Réseaux de Petri :

- Sont un outil de modélisation reconnu pour les possibilités d'analyse, de validation et de vérification.
- Cet outil de modélisation est particulièrement bien adapté à la représentation des systèmes de production.
- Avec cet outil de modélisation, on peut proposer également une simulation des fonctionnements.
- La simulation permet d'analyser le comportement du système spécifié et de réaliser une première vérification de la cohérence du modèle afin de prouver que le comportement spécifié correspond à celui attendu.
  - En utilisant le logiciel Sirphyco afin de visualiser le fonctionnement du système de production et voire comment fonctionnent M1, M2, M3 ainsi que les robots R14, R11, R12, R13 et le convoyeur. Ceci nous a permis de visualiser le temps de travail d'un cycle à partir des graphes.
- En deuxième étape on a pris en considération les temps des pannes de chaque machine puis on a refait la simulation on a constaté l'arrêt de chaque machine en panne et l'augmentation du temps d'un cycle de travail (voire les graphes des temps places).

# Bibliographie

- [1] B. T. E. *La gestion de production : connaissance fondamentales*, B. T. E., 1991.
- [2] J. A. Buzacott, "Automatic transfer lines with buffer stocks", *The International Journal of Production Research*, vol. 5, No. 3, pp.183-200, 1967.
- [3] J. A. Buzacott and L. E. Hanifin, "Models of Automatic Transfer Lines with Inventory Banks: A Review and Comparison", *AIIE Transactions*, vol. 10, no. 2, pp.197- 207, 1978.
- [4] J. A. Buzacott and J. G. Shanthikumar, *Stochastic Models of Manufacturing Systems*, Englewood Cliff, NJ: Prentice-Hall, 1992.
- [5] D. Dubois et J.-P. Forestier, "Productivité et en-cours moyens d'un ensemble de deux machines séparées par un zone de stockage", *R.A.I.R.O. Automatique/System Analysis and Control*, vol. 16, No. 2, pp. 105-132, 1982.
- [6] S. B. Gershwin, "Assembly/disassembly systems: an efficient decomposition algorithm for tree-structured networks," *IIE Transactions*, Vol. 23, No. 4, pp. 302-314, December, 1991.
- [7] S. B. Gershwin, *Manufacturing Systems Engineering*, Prentice Hall, 1994.
- [8] Y. Gousty, J. P. Kieffer, "Une nouvelle typologie pour les systèmes industriels de production", *Revue française de gestion*, pp. 104-112, 1988.
- [9] F. Lambersend, "Organisation et genie de production", Technosup, 1999.
- [10] C. G. Cassandras, *Discrete Event Systems: Modeling and Performance Analysis*, Richard D. Irwin, Inc., and Aksen Associates, Inc., 1993.
- [11] J.-P. Forestier, "Modélisation stochastique et comportement asymptotique d'un système automatisée de production", *R.A.I.R.O. Automatique/System Analysis and Control*, vol. 14, No. 2, pp. 127-143, 1980.

- [12] M. Adamou, *Contribution à la modélisation en vue de la conduite des systèmes flexibles d'assemblage à l'aide des réseaux de Petri orientés objet*, Thèse de doctorat, Université de Franche-comté, 1997.
- [13] R. Akella and P. R. Kumar, "Optimal control of production rate in a failure prone manufacturing system", *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 31, No. 2, pp. 116- 126, 1986.
- [14] Simon Collart-Dutilleul. *Réseaux de Petri P-temporels : Modélisation et validation d'exigences temporelles*. PhD thesis, Université des Sciences et Technologie de Lille-LilleI, 2008.
- [15] Louchka Popova-Zeugmann. Time petri nets. In *Time and Petri nets*, pages 31–137. Springer, 2013.
- [16] Jiacun Wang. *Timed Petri nets : Theory and application*, volume 9. Springer Science & Business Media, 2012.
- [17] J-M. PROTH : *Les réseaux de Petri pour la configuration et la gestion des systèmes de production*. 1995 MASSON
- [18] R.DAVID et H.ALLA : *Du GRAFCET aux Réseaux de Petri*. 1997 HERMES
- [19] A.CHOQUET-GENIET : *Les Réseaux de Petri, un outil de modélisation*. 2006 DUNOD