

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université M'hamed Bougara Boumerdès  
Faculté des Sciences de l'Ingénieur  
Département maintenance industrielle



## MÉMOIRE DE MAGISTÈRE

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Maintenance des Systèmes Mécaniques

Réalisé par :

M<sup>elle</sup> SAGGADI Samira

### Thème

**Optimisation des temps d'attente des  
systèmes flexibles de production basée sur  
les réseaux de Petri**

Soutenu publiquement le :     /     0 / 2007

Devant un jury composé de :

Mr. REFOUFI Larbi	Professeur	UMBB	Président
Mr. DIAF Moussa	Maître de conférence	UMMTO	Examineur
Mr. MOHAMMEDI Kamel	Maître de conférence	UMBB	Examineur
Mr. ADJERID Smail	Maître de conférence	UMBB	Examineur
Mr. BENZAZZOUZ Djamel	Professeur	UMBB	Rapporteur

Année universitaire 2006-2007

# Sommaire :

Remerciement.....	i
Résumé.....	ii
Table des figures.....	iii
Table des tableaux.....	iv
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I: Systèmes Flexibles de Production</b>	
<b>I.1- Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>I.2- Définition d'un système de production.....</b>	<b>4</b>
<b>I.3-Les systèmes automatisés de production et la gestion de production.....</b>	<b>4</b>
I.3.1-Système automatisé de production .....	4
I.3.2- Gestion d'un système automatisé de production .....	5
I.3.2.1- Niveau 1: gestion prévisionnelle .....	5
I.3.2.1.1- La complexité du système de production .....	5
I.3.2.1.2- L'inertie du système de production .....	6
I.3.2.2- Niveau 2: gestion temps réel ou pilotage .....	6
<b>I.4- Système de production flexible .....</b>	<b>7</b>
<b>I.5- Evolution des systèmes de production .....</b>	<b>7</b>
I.5.1- Système de production en ligne .....	8
I.5.2- Système de production linéaire Flow-shop .....	8
I.5.3- Système de production non-linéaire job-shop .....	8
<b>I.6- Les caractéristiques des systèmes flexibles de production.....</b>	<b>9</b>
I.6.1-Flexibilité.....	9
I.6.2-Réactivité.....	10
I.6.3- Proactivité.....	10
I.6.4- Robustesse.....	10
<b>I.7-Vers des structures de production flexibles et réactives.....</b>	<b>11</b>
I.7.1- Atelier flexible .....	12
I.7.2- Eléments constitutifs des ateliers flexibles .....	13
I.7.3-Cellule flexible .....	13
<b>I.8- Cycle de Vie d'un Atelier Flexible.....</b>	<b>13</b>
I.8.1- Spécification des Produits.....	13
I.8.2- Conception Préliminaire.....	14
I.8.3-Conception Détaillée.....	14
I.8.4-Production.....	14
I.8.5- Démantèlement ou Evolution du Système.....	15

<b>I.9-Conclusion</b> .....	15
<b>Chapitre II : Les réseaux de Petri</b>	
<b>II.1- Introduction</b> .....	16
<b>II.2- Concepts de base et définitions des Réseaux de Petri</b> .....	16
II.2.1-Définition.....	16
II.2.2-Règles de fonctionnement.....	17
II.2.3-Marquage d'un Réseau de Petri.....	17
II.2.4-Marquage initial.....	17
II.2.5- Dynamique des Réseaux de Petri.....	18
II.2.5.1-Marquages Accessibles et Graphe des Marquages.....	18
II.2.5.2-Séquence de Franchissement.....	19
II.2.5.3-Vecteur Caractéristique.....	19
II.2.6 - Représentation matricielle.....	20
II.2.7-Equation Fondamentale.....	20
<b>II.3-Element de modélisation par les réseaux de Petri</b> .....	21
II.3.1- Parallélisme.....	21
II.3.2- Synchronisation.....	21
II.3.3-Conflit.....	22
<b>II.4-Principales propriétés</b> .....	22
II.4.1- Les propriétés dynamique.....	22
II.4.2- Les propriétés structurelles.....	23
<b>II.5- Réseaux de Petri Particuliers</b> .....	24
II.5.1- Graphe d'états.....	24
II.5.2- Graphe d'événement.....	24
II.5.4- Réseaux de Petri à choix libre.....	25
II.5.5-Réseaux de Petri simple.....	25
II.5.6- Réseau de Petri Pur et Réseau de Petri Impur.....	25
<b>II.6- Différents modèles des Réseaux de Petri (RdPs)</b> .....	26
II.6.1- Réseaux de Petri ordinaire.....	26
II.6.2-Réseaux de Petri temporisés.....	26
II.6.3- Réseaux de Petri stochastique.....	27
II.6.3.1-Définition et fonctionnement.....	28
II.6.3.2-Durée de sensibilisation stochastique.....	28
II.6.3.3-Processus stochastiques.....	28
II.6.3.4- Processus de Markov.....	29
II.6.3.5- calcul des paramètres de performance.....	31
<b>II.7- Conclusion</b> .....	32
<b>Chapitre III: Les RdP pour la Modélisation et l'analyse d'un atelier</b>	
<b>III.1- Introduction</b> .....	33
<b>III.2- Description de l'atelier flexible</b> .....	33

III.2.1- Composantes constitutifs et leur disposition.....	33
III.2.2-Cycle de fonctionnement.....	35
III.2.3-Conditions particulières de fonctionnement.....	36
<b>III.3-Modelisation de l'atelier.....</b>	<b>36</b>
III.3.1- Modélisation des deux cellules ( $C_1$ et $C_2$ ) .....	37
III.3.2-Modélisation du chariot (AGV).....	39
III.3.3-Modèle réseau de Petri global de l'atelier.....	41
III.3.4-Modélisation des macro places $P_3$ , $P_6$ et $P_{13}$ .....	42
III.3.5-Modélisation des macro places $P_4$ et $P_{11}$ .....	43
<b>III.4- Conclusion.....</b>	<b>45</b>
 <b>Chapitre IV: Optimisation des temps d'attente</b>	
<b>IV.1 -Introduction.....</b>	<b>46</b>
<b>IV.2- Validation des modèles.....</b>	<b>46</b>
<b>IV.2.1 -Les propriétés des modules 1 et 3 .....</b>	<b>46</b>
IV.2.1.1 - Caractéristiques du module1 et du module3.....	46
IV.2.1.2 - Analyse des deux réseaux de Petri des modules 1 et 3.....	46
IV.2.2 -Recherche des propriétés du modèle de l'AGV.....	48
IV.2.2.1- Les états de blocage.....	48
IV.2.2.2- Résolution du problème de blocage.....	49
IV.2.2.3-Vérification des propriétés du réseau obtenu.....	50
IV.2.2.4 -Construction de l'arbre de couverture.....	51
IV.2.2.5- Interprétation de l'arbre de couverture.....	51
IV.2.2.6- Transformation du RdP du module 2.....	52
IV.2.2.7-Graphe des marquages accessibles.....	53
IV.2.2.8- Construction de la chaîne de Markov.....	53
<b>IV.3- Evaluation des Performances par Simulation.....</b>	<b>54</b>
IV.3.1- Les résultats de la simulation du réseau de Petri de l'AGV.....	54
IV.3.1.1-Les fréquences et les temps de séjour dans les places.....	54
IV.3.2- Analyse des résultats de la simulation.....	55
IV.3.2.1- Les temps de séjour dans les places.....	55
IV.3.2.2- Les fréquences moyennes de franchissement des transitions....	55
IV.3.3- Les premiers résultats de la chaîne de Markov de l'AGV.....	56
IV.3.4 –Calcul de la cadence avec les attentes .....	56
IV.3.5–Minimisation du temps de cycle.....	57
IV.3.6- Le second résultats de la chaîne de Markov de l'AGV.....	58
IV.3.7 –Calcul de la cadence sans attentes .....	59
<b>IV.4- Etude des stocks.....</b>	<b>61</b>
<b>IV.5- Résolution des attentes dues aux indisponibilités des stocks.....</b>	<b>62</b>

<b>IV.6-Modélisation du déchargement d'un seul stock de sortie .....</b>	<b>62</b>
IV.6.1 : Représentation du déchargement .....	63
IV.6.2- la chaîne de Markov correspondante au réseau de Petri .....	64
IV.6.3- les résultats par simulation pour une période de déchargement .....	64
<b>IV.7- Modélisation des stocks de sortie des deux produits.....</b>	<b>65</b>
<b>IV.8-Conclusion.....</b>	<b>66</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>67</b>
<b>Annexe</b>	
<b>Annexe 1.....</b>	<b>69</b>
<b>Annexe 2.....</b>	<b>77</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>83</b>

## Résumé

La complexité croissante des processus de fabrication, le désir d'une utilisation optimale des ressources de production et la poursuite d'objectifs de production multiples rendent nécessaire l'utilisation de méthodes efficaces de modélisation et d'analyse de ces systèmes. Les systèmes manufacturiers à contraintes de temps constituent le cadre de notre étude.

L'objectif de ce travail est de modéliser le comportement dynamique des composantes d'un système flexible de production et d'évaluer ses performances par les réseaux de Petri tout en optimisant les temps d'attente du moyen de transport, ainsi que les attentes dues aux indisponibilités des stocks. La simulation de notre modèle a été réalisée sous le logiciel MOCA-RP et les résultats obtenus indiquent une amélioration de la productivité.

**Mots clés :** Système de production – optimisation – réseau de Petri – atelier flexible de production.

## ملخص

إن التعقيدات المتنامية لطرق التصنيع و الرغبة للنمذجة لامكانيات الإنتاج و استمرارية السعي لتطبيق أهداف الإنتاج المتعددة يجعل من الضروري استعمال طرق ناجعة للنمذجة و تحليل الانظمة تدخل الانظمة المعملية ذات التقيدات الزمنية فى اطار الدراسة التى قمنا بها. الهدف من هذا العمل هو نمذجة السيرة الديناميكية لمكونات نظام مرن للإنتاج و تقييم مستوى ادائه عن طريق شبكة "بيترى" اخدين بعين الاعتبار تقليص زمن الانتظار لوسائل النقل, و الانتظارات الناجمة عن انعدام المخزون. محكات النموذج المقترح قد تم بواسطة البرمجية

## MOCA RP

النتائج المتحصل عليها تشير إلى تحسین الإنتاجية.  
الكلمات الرئيسية شبكة بيترى- نظام مرن للإنتاج – امكانيات الإنتاج

## Abstract

The increasing complexity of the manufacturing processes, the desire of an optimal use of production resources and the continuation of multiple production objectives make necessary the use of effective modeling methods and systems analysis. The manufacturing systems with time constraints constitute the framework of our study.

The objective of this research work is to model the dynamic behavior of the components of a flexible system production and to evaluate its performances using Petri nets while optimizing the transport waiting times, as well as the waiting times due to stocks unavailabilities. The simulation of the case study model was performed under **Moca-RP** software and the obtained results indicate an improvement of the productivity.

**Key words:** Production system – optimisation – Petri net – flexible manufacturing system

## **Remerciements**

*Je remercie le Allah le tout puissant pour le courage qu'il m'a décerné pour l'aboutissement de ce travail.*

*J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur L.REFOUFI, professeur à l'université de Boumerdes, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de mon mémoire magister.*

*Je suis très reconnaissante à*

*Monsieur s.ADJERID, maître de conférences à l'université de Boumerdes.*

*Monsieur k.MOHAMMEDI, maître de conférences à l'université de Boumerdes.*

*Monsieur m.DIAF, professeur à l'université de Tizi-Ouzou.*

*De l'honneur qu'ils me font et l'intérêt qu'ils ont bien voulu, porter à ce travail, en acceptant de l'examiner.*

*Je tiens aussi à exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements les plus sincères à Monsieur Dj.BENAZZOUZ professeur à l'UMBB, mon directeur de thèse, m'avoir proposer le sujet, et pour la confiance qu'il m'a toujours témoignée. Son expérience dans la recherche, ses conseils, ses encouragements, m'ont permis de bien mener mon travail.*

*Je tiens à remercier Monsieur h.SERRIDI, professeur à l'UMBB, qui m'a accueilli dans son laboratoire de recherche LMSS.*

*Je tiens à remercier également monsieur BENSAFIA, membre du labo LMSS.*

*Il me tient tout particulièrement à coeur de remercier Madame B.HEDAILI, pour l'amitié et le soutien qu'elle m'a apportés durant ma période de graduation ainsi que la post de graduation. Sans oublier la secrétaire du département MI, Melle Hansale fatiha.*

*Je n'oublie pas d'adresser mes vifs remerciements à mes amis du LMSS.*

*Je remercie les membres de ma famille qui m'ont accompagné tout au long de mes études par leur amour inconditionnel et leur soutien constant.*

*Mes pensées vont à ma petite famille, à qui je dois beaucoup dans ma vie.*

*Tous mes remerciements à la famille KARRAOVI.*

*Je remercie en fin tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans l'accomplissement de ce travail.*

## *Dédicaces*

*je dois tout* , à qui

*je dois beaucoup* A mes parents, à qui

*soeurs et frères* A tous mes

*les miens* A tous

*Samira*

## Liste des tableaux

<b>Tableau III.1 :</b>	<b>Les places et transitions du module 1</b>
<b>Tableau III.2 :</b>	<b>Les places et transitions du module 3</b>
<b>Tableau III.3 :</b>	<b>La signification des principales places du module 2</b>
<b>Tableau III.4 :</b>	<b>Signification des transitions du module 2</b>
<b>Tableau III.5 :</b>	<b>Interprétation des places du poste de perçage</b>
<b>Tableau III.6 :</b>	<b>Signification des places des macro places <math>P_4</math> et <math>P_{11}</math></b>
<b>Tableau IV.1 :</b>	<b>Temporisation des places et transitions du module 1</b>
<b>Tableau IV.2 :</b>	<b>Temporisation des places et transitions du module 3</b>
<b>Tableau IV.3 :</b>	<b>Détail des macro places <math>P_3</math>, <math>P_6</math> et <math>P_{13}</math></b>
<b>Tableau IV.4 :</b>	<b>Détail des macro places <math>P_4</math> et <math>P_{11}</math></b>
<b>Tableau IV.5 :</b>	<b>Les taux associés aux transitions</b>
<b>Tableau IV.6 :</b>	<b>Cadence avec les attentes</b>
<b>Tableau IV.7 :</b>	<b>Cadence sans attentes</b>

*Introduction générale*



Introduction générale

## **Introduction générale**

Dans le contexte industriel ou la productivité joue un rôle déterminant et ou les maîtres mots, rendement, flexibilité, qualité et délai, il peut s'avérer fortement dommageable de ne considérer que les aspects logiques (au sens de l'enchaînement des différentes opérations à effectuer) du système de production considéré. En effet bien qu'une abstraction des aspects temporels soit dans certains cas rendue possible par la nature même du procédé étudié (système purement séquentiel), cette dernière peut dans d'autres circonstances aller à l'encontre de la sémantique du système.

Les systèmes flexibles de production, souvent mal maîtrisés, continuent à poser d'énormes problèmes de conception, de modélisation et de conduite. Si dans le passé, l'expérience était suffisante pour concevoir et piloter un système de production, des techniques de calcul, des méthodes de dimensionnement et de gestion sont maintenant exigées. La maîtrise et l'optimisation du fonctionnement d'un système flexible de production nécessitent la disposition d'un modèle fin de son comportement dynamique. Ce modèle est d'un grand secours pour la compréhension et la maîtrise du comportement du système étudié. Un dilemme subsiste cependant entre l'élaboration d'un modèle trop simpliste autorisant une analyse du comportement aisée du système mais éloigné de son comportement réel, et un modèle plus proche du système réel, mais dont l'étude est trop complexe.

La complexité sans cesse grandissante des systèmes de production requiert de plus en plus de méthodes de représentation et de techniques d'analyse, permettant de tenir compte de manière efficace des différentes fonctionnalités associées au système, ainsi que de ses caractéristiques temporelles.

Cet impératif conduit inéluctablement à la nécessité de pouvoir disposer de méthodes formelles permettant de vérifier un certain nombre de propriétés d'intérêt du système modélisé. A cette fin notre choix s'est porté sur les réseaux de Petri.

En effet, les RdP [Bra 82], [Dav et All 92], [Mur 89] représentent un formalisme puissant et reconnu, sont largement utilisés pour la modélisation et l'analyse de système à évènements discrets. Ce succès est dû à de nombreux facteurs. Parmi ceux-ci nous pouvons relever :

- Leur simplicité de compréhension ;
- Leur nature graphique, se prêtant sans grande difficulté à la modélisation de phénomènes complexes ;

- Les conflits et les capacités des stocks tampons peuvent être facilement modélisés ;
- Les RdP peuvent être utilisés pour implémenter des systèmes de contrôle en temps réel, ou bien d'autres applications
- Possibilité de disposer d'un arsenal de résultats mathématiques analytiques.

De nombreuses extensions des RdP ont été proposées dans la littérature, les modèles temporisés sont présentés par [Noe et Nut 73], [Jvt 95], [Sif 77], [Mer et Far 76], [Ram 74], ou les attributs temporels sont des valeurs ponctuelles.

Dans le domaine de la production, beaucoup d'efforts sont portés sur l'application des réseaux de Petri, à la modélisation et l'évaluation des systèmes de production [Laf 91], [Chu et Al 93], [Cre et Gui 94], [Sau 98], [Elm et Mari 99], [Bri et Al 99], [Amo et Al 01], [Her 01], [Lem 01] et [Ben 03].

Les systèmes manufacturiers à contraintes de temps constituent le cadre de notre étude, pour cette grande classe de systèmes, le facteur temps est une composante primordiale. Ce dernier n'affecte pas seulement les performances du système mais aussi sa validité fonctionnelle.

En matière de pilotage des systèmes de production, les performances réellement atteintes au sein d'un atelier sont souvent éloignées de celles initialement prévues en gestion de production. Une raison importante de cet écart réside dans le caractère excessivement rigide des contraintes issues du plan de production. En effet, ce dernier imposant généralement de respecter à la lettre un scénario de fabrication unique, il permet difficilement de s'adapter aux aléas inhérents à la fabrication en temps réel (pannes, retards, etc...), ce qui donne naissance à des temps morts qui sont dus classiquement aux attentes. Parmi ces temps d'attente dans un système de production on distingue :

- Les attentes dues aux chargements/ déchargements de matériels (pièces, outils,...etc) sur machine, chariot et stock ;
- Les attentes du moyen de manutention (chariot filo guidé, rebots...etc) devant les machines à vide pour recevoir une autre pièce [Sim 97] ;
- Les attentes des systèmes de stockage à capacité (plein) pour les vider ;
- Les attentes dues aux phénomènes de congestions ;
- Les temps d'attente dus à l'indisponibilité des ressources (machines, hommes, matière première et stocks) ;

- Les temps d'attente dus aux pannes des composants de l'atelier.

Pour pallier à cet inconvénient, plusieurs approches sont définies dans la Littérature [Agn 00], [Cra et Al 00], or le problème d'optimisation de ces temps d'attente dans les ateliers flexibles de production est considéré comme non polynomial déterministe (NP) difficile. Des algorithmes de calcul heuristiques et exacts ont été proposés [Ess et Al 03], [Man et Al 03]. Cependant, se basant sur la littérature existante, il n'y a pas eu suffisamment de recherches sur l'optimisation des temps d'attente dans les ateliers flexibles de production en utilisant les réseaux de Petri. Motivé par cette réalité, nous nous proposons une méthode de résolution de minimisation de ces attentes basée sur une modélisation par les RdP stochastiques et temporisés.

Notre principal intérêt est d'améliorer l'un des facteurs essentiels des performances des systèmes flexibles de production. En d'autres termes, nous nous intéressons à avoir une meilleure productivité.

Pour ce faire, notre travail est présenté dans ce mémoire en quatre chapitres.

- Le premier chapitre présente des notions générales associées aux systèmes de production plus particulièrement les ateliers flexibles.
- Nous présentons dans le chapitre deux les définitions de bases, les propriétés des réseaux de Petri et quelques extensions commodes. Nous insistons plus particulièrement sur les propriétés et les modes de fonctionnement des RdP temporisés et stochastiques car on les utilisera pour la modélisation de notre étude de cas de l'atelier flexible.
- Le chapitre trois est consacré à la modélisation et à la description de l'atelier flexible, nous proposons une approche de modélisation dont, on décompose le système en trois sous-systèmes (modules), explicitons le fonctionnement de chaque module. Nous présentons la signification de l'ensemble des places qui représentent les opérations et l'ensemble des transitions qui représentent les événements.
- Le chapitre IV constitue le développement du modèle et toute l'analyse qui permet d'apprécier et justifier l'approche considérée.

Dans le dernier chapitre, on illustre la démarche proposée de l'étude de cas de notre atelier, pour optimiser les temps d'attente, on reprenant le modèle du chariot (AGV) décrit dans le chapitre III.

- On termine notre travail par une conclusion et des perspectives.



Systemes flexibles de production

## Systèmes flexibles de production

### I.1. Introduction

Flexibilité, réactivité et agilité sont des qualités incontournables pour des systèmes de production qui se trouvent confrontées à une demande variée et fluctuante avec des contraintes de qualité et de délais de plus en plus fortes. Le défi pour les entreprises est donc d'installer des outils de production modulaires et flexibles avec des systèmes de pilotage capables de les gérer. Ces derniers doivent, d'une part, s'adapter à l'hétérogénéité des équipements disponibles (ordinateurs, MOCN, Robots, etc.), équipements pouvant être remplacés, supprimés ou reconfigurés en fonction des besoins, et d'autre part, être robustes face aux différents dysfonctionnements et aléas [Kou et Pez 03]. Pour pouvoir apporter une bonne compréhension à la modélisation de l'atelier flexible on donnera d'abord les notions générales associées aux systèmes flexibles de production.

### I.2. Définition d'un système de production

Un système de production est constitué de toutes les ressources nécessaires, tant humaines que matérielles qui permettent de transformer la matière première et/ou les composants en produits finis. Les systèmes de production sont organisés et gérés en fonction des demandes et des ressources disponibles. La production peut être déclenchée par des commandes des clients ce qui est appelée «production à la demande», comme elle peut anticiper ces demandes, dans ce cas elle est appelée 'production provisionnelle' [Djo 94].

### I.3. Les systèmes automatisés de production et la gestion de production

#### I.3.1. Système automatisé de production

Un système automatisé de production (SAP) se caractérise par l'automatisation de certaines fonctions du système de production [Tch 94] et qui sont :

- Les fonctions de transformation: machines automatisées, etc.
- Les fonctions de manutention: convoyeurs automatisés, etc.
- Le stockage: magasins automatisés, etc.
- Le traitement de l'information: calculateurs, etc.

L'automatisation permet de gérer de manière efficace la production [Gia 88], elle permet la création d'un suivi performant et elle induit potentiellement une meilleure productivité et une meilleure flexibilité [Noy 87]. En résumé, l'automatisation de la production permet de diminuer les temps de réponse et d'augmenter la flexibilité de la structure de production. Elle constitue par ailleurs une condition nécessaire pour la mise en place de la structure de pilotage

décrite dans le reste de notre travail. Le concept de système automatisé de production a été associé à celui plus étendu de CIM (Computer Integrated Manufacturing) depuis la fin des années 70.

### I.3.2. Gestion d'un système automatisé de production

De façon générale, la gestion d'un SAP comporte deux niveaux tel que le montre Figure I.1. Le niveau 1 définit la gestion prévisionnelle, elle assure l'anticipation et la programmation d'un ensemble d'actions ou de décisions. Le niveau 2 définit la gestion temps réel, elle élabore les décisions et les actions qui sont réalisées en temps réel et qui sont donc déclenchés par un ensemble d'événements liés à l'état courant du système de production.

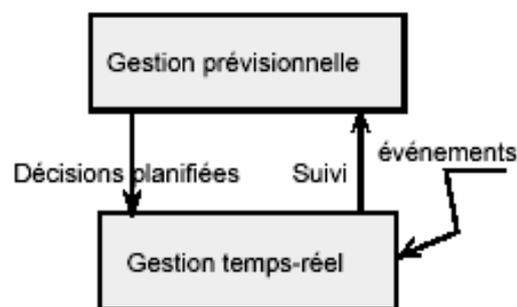


Figure I.1 : Interactions entre les deux niveaux de gestion d'un SAP.

#### I.3.2.1. Niveau 1: gestion prévisionnelle

La complexité et l'inertie du système de production conduisent à mettre en oeuvre une gestion prévisionnelle [Mer 87].

##### I.3.2.1.1. La complexité du système de production

Plusieurs éléments sont à l'origine de cette complexité. Notons principalement

- La diversité des types des ressources composant le système: ressources informatiques, mécaniques, électriques ou humaines. La gestion d'un ensemble de ressources hétérogènes est rendue difficile notamment par les différents niveaux nécessaires de connaissance, d'intelligence et les diverses possibilités de communication entre ces ressources.
- La multiplicité et parfois la contradiction entre les objectifs de production en terme de coût, délai ou qualité. Par exemple, la production organisée suivant un objectif global de qualité impliquera certainement un rendement global plus faible qu'une production organisée selon un objectif portant sur la minimisation des délais. Ce point introduit la notion d'ordonnancement multi-objectif.
- La complexité des calculs prévisionnels qu'il est nécessaire, la plupart du temps, d'effectuer hors ligne.

### I.3.2.1.2. L'inertie du système de production

L'inertie est due principalement aux composantes mécaniques et humaines du système de production. Elle est définie en terme de temps de production, de changement d'outil, de calendriers (postes de travail), etc. Ainsi, la gestion prévisionnelle permet l'intégration de cette inertie par la planification de certaines actions au niveau du système de production. Ce niveau peut être décomposé de manière générale en deux ou trois fonctions selon la structure de pilotage adoptée et la présence ou non d'un ordonnancement prévisionnel.

### I.3.2.2. Niveau 2: gestion temps réel ou pilotage

Cette gestion se justifie par l'altération des données sur lesquelles sont effectuées les prévisions du niveau 1 (le système de production est soumis à des perturbations, à des modifications structurelles et/ou de son environnement) et l'accessibilité, la fiabilité ou l'agrégation des données due au volume important d'informations à traiter et parfois contradictoires. Ainsi, nous définissons le pilotage comme la structure de décision et d'information associée à la gestion temps réel.

#### Les fonctions de pilotage

La fonction pilotage temps réel comprend deux sous fonction; conduite et commande [Arc 91], [Din 92], [Tch 94], comme le montre Figure I.2. La fonction conduite regroupe les activités décisionnelles qui sont traduites en ordres et transmises au niveau commande. Ce dernier niveau gère la réalisation du processus physique de fabrication et retourne au niveau conduite un ensemble de données de suivi. Nous détaillons chacune des fonctions comme suit

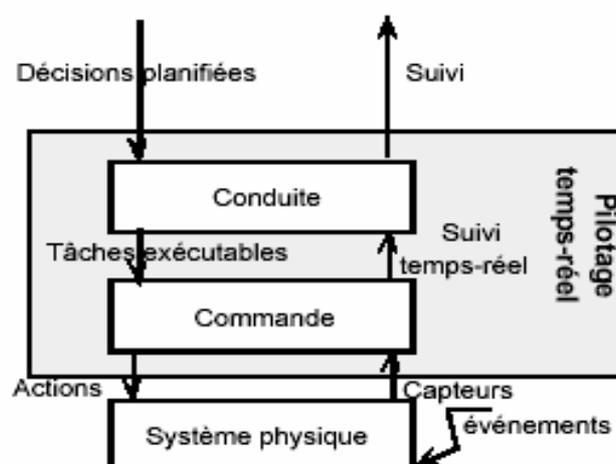


Figure I.2 : les fonctions de pilotage

- **La conduite**

La conduite correspond au niveau décisionnel du pilotage dont le rôle principal est de mettre en oeuvre les décisions planifiées par le niveau prévisionnel. Si l'état du système de production ne permet pas d'appliquer correctement ces planifications, une décision peut être prise localement. Si aucune décision locale ne peut remédier au problème, il sera nécessaire de remettre en question les décisions du niveau supérieur. La conduite peut être décomposée en sous fonctions dont les principales sont le contrôle qui assure la cohérence globale du système de pilotage et gère les interactions entre les différents centres de décision, etc. puis la gestion de l'environnement qui consiste à la gestion de la logistique technique. A ces deux fonctions est associée la fonction de suivi qui collecte les données nécessaires au suivi de fonctionnement du système, de ses performances, du respect des objectifs, etc.

- **La commande**

Cette fonction correspond à la commande des équipements et automatismes. Elle regroupe notamment les fonctions de l'informatique industrielle.

#### **I.4. Système de production flexible**

Un système de production flexible est généralement un système à fonctionnement cyclique conçu pour fabriquer simultanément des différents types de produits. Cette flexibilité est possible grâce à l'utilisation des machines multi tâches et de moyens de transport automatisés. La fabrication d'un produit nécessite l'exécution d'une suite d'opérations. Nous supposons que chaque opération peut être exécutée par une seule machine. L'étude de ces systèmes flexibles est soumise aux hypothèses suivantes [Djo 94].

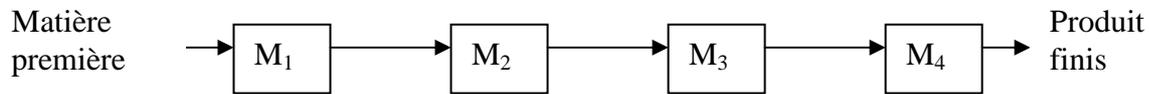
- Pas d'aléas de fonctionnement.
- Les ressources sont en nombre limité, Chaque ressource de transport prend en charge une seule pièce et pas de conflit entre elles.
- Temps nécessaire de passage d'une machine à une autre est négligeable par rapport au temps opératoire (il est supposé nul).
- Temps de chargement d'outils est négligeable par rapport au temps opératoire (il est supposé nul) et le temps de passage sur machines est déterministe

#### **I.5. Evolution des systèmes de production**

Les systèmes de production ont connu une évolution sans cesse [Djo 94]. Cependant, nous pouvons résumer le développement de ces systèmes comme suit :

**I.5.1. Système de production en ligne**

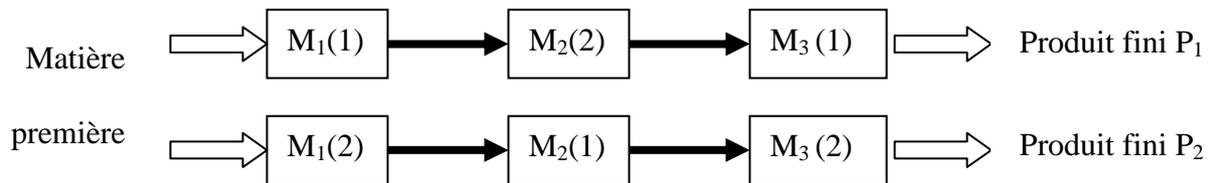
Ces systèmes sont adaptés à la production de masse d'un produit unique.  $M_i$  : unité de production (machine, outil, etc....) La matière première subit une série de transformations suivant une ligne unique appelée ligne de production.



**Figure I.3 : Système de production en ligne**

**I.5.2. Système de production linéaire flow-shop**

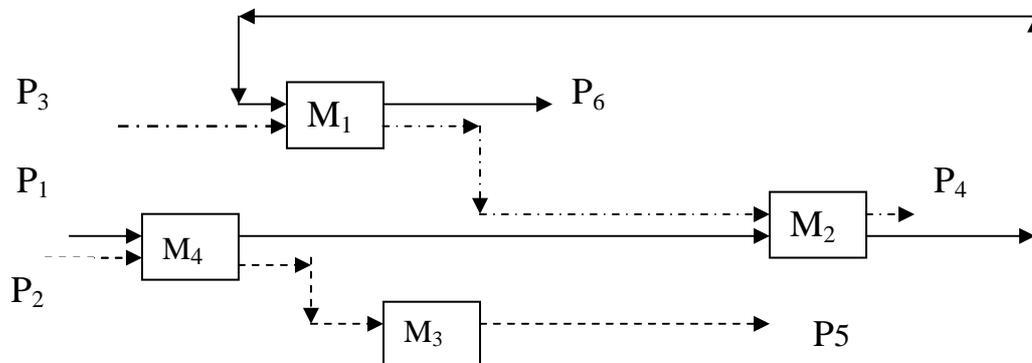
Un flow-shop est composé d'un ensemble d'unités de fabrication, pour fabriquer plusieurs types de produits. L'ordre de passage de chaque produit sur les unités est identique pour tous les produits. Seuls les temps de passage sur les machines diffèrent.



**Figure I.4 : Système de production linéaire Flow-shop**

**I.5.3. Système de production non-linéaire job-shop**

Un job-shop est constitué d'un réseau de machines reliées entre elles par des ressources de transport (chariots, palettes,...). Un système job-shop permet d'assurer la production simultanée de plusieurs types de produits. Chaque produit passe par un sous ensemble de l'ensemble des machines, l'ordre de passage des différents types de produits sur ces machines n'est pas identique.



**Figure I.5 : Système de production non linéaire job-shop**

## I.6. Les caractéristiques des systèmes flexibles de production

Le contexte économique dans lequel les entreprises évoluent aujourd'hui ne permet plus de produire efficacement à partir des systèmes de production basés sur les principes du Taylorisme, qui ont fait largement leurs preuves. Il nécessite des systèmes de production basés sur d'autres principes, ayant des nouvelles caractéristiques, telles que la flexibilité, la réactivité, la pro activité et la robustesse. [Dra, Bri et Fil 00 ].

### I.6.1. Flexibilité

L'évolution croissante des besoins d'une entreprise fait que la conception du système de production est de plus en plus orientée vers des familles de produits et non vers un seul type de produit. Les systèmes correspondants à une telle exigence doivent se révéler flexibles. La flexibilité d'un système de production se caractérise par sa capacité d'adaptation à la production des nouveaux produits pour lesquels le système n'a pas été étudié. Cela suppose une adaptation totale du système de production au produit courant (de la distribution des flux discrets de composants aux opérations qu'effectuent les moyens de production sur le produit). Plusieurs types de flexibilité [Abr 96] et [Ada 97] ont été mis en évidence suivant leurs incidences sur l'objectif qui est le produit fini et sur les moyens de production permettant la réalisation de ce produit.

- *Flexibilité de produits* : offre la possibilité d'une reconfiguration du système pour la prise en compte d'un nouveau produit ou famille de produits permettant ainsi un gain de productivité.
- *Flexibilité de mélange* : c'est la possibilité de produire simultanément un ensemble de produits ayant des caractéristiques de base communes; cette flexibilité peut être mesurée par le nombre de produits différents qui peuvent être fabriqués simultanément
- *Flexibilité de quantité* : il s'agit de la capacité du système à faire face aux fluctuations de la quantité des produits à fabriquer en modifiant les rythmes, ainsi que les temps de passage et d'engagement des outils
- *Flexibilité de routage* : offre au système les moyens d'un aiguillage plus souple, de façon à servir les différents segments de procédés libres ou sous -engagés
- *Flexibilité d'ordre des opérations*: permet de changer l'ordre des opérations en cours de production (ce qui suppose l'existence d'une gamme principale et des gammes secondaires) ou de choisir la destination suivante après chaque opération
- *Flexibilité d'expansion*: autorise une extension et une modification de l'architecture du système et elle exige une modélisation

- *Flexibilité des ressources*: c'est la capacité des ressources à effectuer plusieurs tâches élémentaires et de permettre la programmation.

En considérant les définitions données ci-dessus on peut déduire que la flexibilité est un facteur déterminant.

### **I.6.2. Réactivité**

Une exigence importante du client est de recevoir sa livraison dans les délais impartis et ce quel que soit le carnet de commande. Satisfaire une telle exigence impose au système de production d'être réactif, c'est à dire capable de répondre rapidement et économiquement à un changement (fabrication multi produits, introduction d'une commande urgente, modification d'une norme etc.) ou à un aléa. Ces aléas peuvent provenir soit du système de production (défauts d'alimentations, défauts de réalisations d'une tâche, pannes des machines, rebuts) soit de son environnement (approvisionnements des matières premières).

La réactivité d'un système de production est définie comme l'aptitude à répondre (réagir) dans un temps requis aux changements de son environnement interne ou externe (aléa, situation nouvelle, perturbation, sollicitation,...) par rapport au régime (fonctionnement) permanent (stable). La réactivité se pose en terme de mesure de la qualité d'une certaine performance du système de production.

### **I.6.3. Pro activité**

La pro activité d'un système de production se caractérise par ses capacités d'anticipation (prévoir et/ou provoquer) les changements d'état, d'apprentissage et d'enrichissement des connaissances (pour améliorer sa réactivité), d'adaptation ses règles de fonctionnement et par sa capacité de réorganisation reposant sur une architecture décentralisée et une délégation de responsabilité. Un système de production proactif est avant tout un système réactif. La pro action sous entend l'existence de la réaction. La réaction consiste dans l'application de règles fixées, en réponse aux événements, tandis que la pro action, en considérant la définition donnée ci-dessus, ajuste en quelque sorte son environnement et modifie les règles de fonctionnement afin de gérer et maîtriser les aléas néfastes à la performance industrielle.

### **I.6.4. Robustesse**

Une autre exigence du client est d'acquiescer sa commande avec la garantie d'une certaine qualité. Cela oblige le concepteur du système de production à imposer au système de production une certaine robustesse. La robustesse d'un système de production se définit par

son aptitude à produire conformément aux résultats attendus. Cela suppose la garantie de l'obtention des performances souhaitées en présence d'incertitudes dans le système. L'acquisition de ces quatre propriétés est liée à une réorganisation notable du système de production.

### **I.7. Vers des structures de production flexibles et réactives**

La transition vers une architecture fédératrice décentralisée a entraîné, au niveau du système de production un accroissement important des capacités de décision. En effet, la flexibilité et la réactivité imposent un traitement local de l'ensemble des événements entrants. Seuls les flux d'information indispensables au bon fonctionnement d'un système de production doivent donc être conservés les ordres de fabrication et les commandes de matières premières. Tout autre échange d'information entraîne une hausse importante des délais. De plus les échanges de matières doivent être limités au maximum (zéro stock) afin de limiter les coûts de production. L'utilisation des machines-outils à commande numérique (MOCN) et l'automatisation ont permis de réaliser un compromis entre la productivité des lignes de transfert et la flexibilité/réactivité des machines servies par l'opérateur humain, voir Fig. I.6. La décomposition des différents types de structures de production n'est en fait que le fruit de l'introduction progressive de l'informatique au cours du système de production. D'après [Coi 93], cette évolution peut être décomposée en trois étapes majeures. Dans un premier temps l'apparition de l'informatique industrielle a permis la création de processus automatiques plus complexes et plus souples que ceux supportés antérieurement (automatismes mécaniques et automates programmables de la première génération). L'application de ces processus aux systèmes de production a conduit à l'apparition des MOCN (machine outil à commande numérique) qui permettent d'approcher la productivité et la flexibilité de l'opérateur humain voir Fig I.6, flèche 1. La réactivité, par contre, est loin d'être aussi élevée mais les MOCN compensent ce défaut, par une excellente robustesse. Dans un second temps, ces mêmes processus automatiques ont permis la réalisation de systèmes robotisés de plus en plus performants. Les MOCN ont alors pu être regroupées en cellules (petits groupes de machines regroupées autour d'un mécanisme robotisé et orienté vers la fabrication d'une gamme de pièce) puis, pour des productions en plus grandes séries, en lignes flexibles. Cette structure permet en effet de conserver la cadence propre aux lignes de transfert (en limitant l'appel aux procédures complexes d'ordonnancement) tout en produisant, grâce aux MOCN, des pièces différentes au sein d'une même famille voir Figure I.6, flèche 2.

Enfin, dans un dernier temps, l'introduction directe de l'ordinateur dans la gestion du cycle de production a favorisé l'utilisation des techniques avancées de l'informatique (système d'information, intelligence artificielle,...). Celles-ci ont alors apporté à l'automatisation flexible les processus de décision qui lui manquaient pour décentraliser au maximum les processus de décision et se libérer des structures linéaires ou parallèles caractéristiques des lignes ou des cellules flexibles. Dès lors, une pièce entrant dans un atelier peut suivre des cycles d'usinage complexes grâce au gain de puissance apporté par l'informatique au système de pilotage humain voir Figure. I.6, flèche 3. L'atelier flexible constitue ainsi un compromis efficace entre la flexibilité/réactivité des machines servies manuellement et la productivité des lignes de transfert.

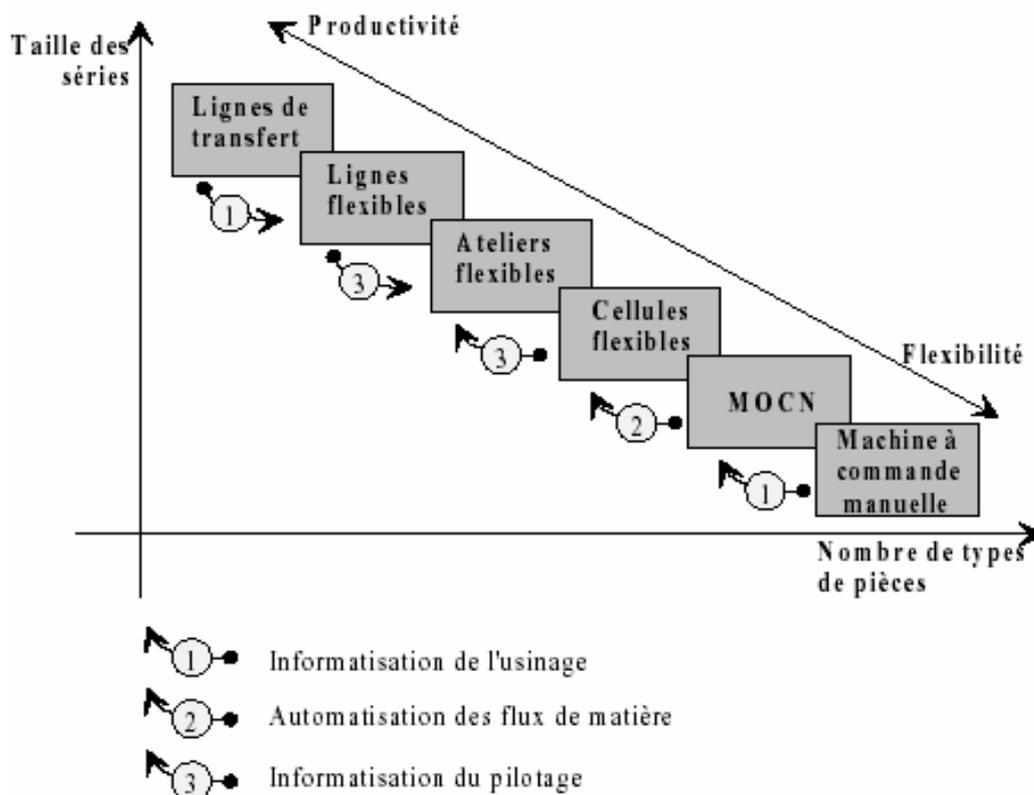


Figure I.6 : Les différentes structures de production

### I.7.1. Atelier flexible

D'après [Coi 93] un atelier flexible (ou flexible manufacturing system, FMS) est un ensemble de machines reliées par un système de manutention automatique, le tout contrôlé par un système central informatisé. Cette définition est en parfaite cohérence avec les trois phases énumérées ci-dessus. Cependant elle doit être complétée par 'ce ne sont pas ses composants qui font d'un système de production un atelier flexible mais ses performances en

termes de flexibilité et réactivité'. En effet, l'atelier flexible doit permettre des cycles de fabrication complexes, variables, passant par des machines différentes ou dans un ordre différent.

### **I.7.2. Eléments constitutifs des ateliers flexibles**

Bien qu'il n'existe pas de définition formelle de ce qu'est un atelier flexible (chaque atelier ayant des caractéristiques propres), il y a néanmoins un ensemble de composants que l'on retrouve systématiquement au sein de chaque atelier flexible [Kus 90] et qui sont :

- Un ensemble de machines programmables ou de station de travail plus ou moins flexibles, en général, ces machines peuvent réaliser divers types d'opérations.
- Un système de stockage distribué au niveau de chaque station de travail et/ou centralisé au niveau global de l'atelier.
- Un système de décision sophistiqué qui doit décider à chaque instant ce qui doit être fait et sur quelle machine. Les systèmes de conduite et de commande d'ateliers sont en général des systèmes répartis, souvent construits autour d'un réseau local industriel.

### **I.7.3. Cellule flexible**

Fréquemment, les ateliers flexibles sont structurés en un ensemble de cellules flexibles. Une cellule flexible est constituée d'un ensemble de machines, d'un système de stockage local et d'un système de manipulation automatisé permettant le transfert des pièces à usiner à l'intérieur de la cellule. La manipulation est généralement réalisée à l'aide d'un robot manipulateur. Ce type d'architecture favorise une répartition des tâches à réaliser, un ensemble de tâches plus au moins similaires étant attribué à chaque cellule. De plus, le fait de regrouper les opérations au niveau de cellules diminue considérablement les temps de transport à l'intérieur de l'atelier.

## **I.8. Cycle de vie d'un atelier flexible**

Le cycle de vie d'un atelier flexible d'après [Jul 97] est généralement constitué par un ensemble d'étapes qui sont la spécification des produits, la conception préliminaire, la conception détaillée, la production et le démantèlement ou évolution du système.

**I.8.1. Spécification des produits**, c'est la première étape du cycle de développement d'un système de production. Elle est directement issue d'une étude du marché et est à l'origine de la mise en place d'un projet de conception d'un système de production. Précisons qu'avec l'introduction de la notion de flexibilité, les systèmes de production doivent être non

seulement capables de réaliser plusieurs types de produits, mais aussi de suivre l'évolution du marché et par conséquent de modifier progressivement les produits réalisés initialement au sein du système de production.

### **I.8.2. Conception préliminaire**, durant cette phase il faut

- Choisir les ressources parmi celles qui sont disponibles (machines, système de transport, robot, etc....) afin d'être capable de réaliser la production définie à l'étape précédente,
- Etudier la meilleure disposition de ressources sur la surface disponible (agencement du système),
- Choisir le système de gestion de production que l'on appliquera au système physique,
- Evaluer le comportement dynamique du système afin d'obtenir tout un ensemble d'indices de performance qui vont permettre de vérifier si le système répond bien au cahier des charges défini à l'étape précédente.

**I.8.3. Conception détaillée**, elle consiste à réaliser l'implantation physique du système de production. Après avoir formé le personnel qui va participer au bon fonctionnement du système.

**I.8.4. Production**, elle correspond au fonctionnement normal du système. On retrouve ici des opérations comme la gestion de la production, la conduite temps réel, la surveillance et la maintenance du système. Du fait de la complexité d'un atelier flexible, une étude globale du système est difficilement possible et la structure de décision de l'atelier est généralement décomposée en une hiérarchie de niveaux d'abstraction [Ers 86, Sil 89], le but d'une telle décomposition est de ramener la résolution d'un problème de grande dimension aux caractéristiques variées, à une suite de résolutions de problèmes de taille raisonnable ayant des caractéristiques plus homogènes. Le but ici n'est plus de retenir une solution parmi un ensemble d'alternatives mais plutôt de restreindre progressivement l'ensemble des alternatives possibles en utilisant les connaissances propres à chaque niveau. Les niveaux de décision classiques sont les suivant :

- **Planification**, à ce niveau de la production, on doit établir un plan de production agrégé en fonction d'une estimation de la demande des clients et de la prévision de l'évolution du marché. C'est ici que l'on définit les divers taux de production c'est-à-dire le nombre de produits à traiter par semaine ou par mois.

- **Ordonnancement**, c'est ce niveau que doit être élaboré le plan de fabrication détaillé. On définit l'ordre d'exécution de chaque opération sur chaque machine tout en tenant compte des

contraintes imposées par le niveau de décision supérieur (planification). Nous retrouvons en particulier le respect des taux de production et le pré allocation des ressources. Parce que chaque machine peut exécuter diverses opérations, l'explosion combinatoire du nombre d'alternatives possibles dans le cas des ateliers flexibles est énorme.

- **Supervision et pilotage en temps réel**, les deux fonctions principales sont la surveillance et la prise de décision en temps réel. La fonction de surveillance permet de détecter en temps réel tous les comportements anormaux (panne de machine) [Sah 87, Cou 89] et d'effectuer un diagnostic efficace afin d'orienter au mieux l'équipe de manutention. La fonction de prise de décision en temps réel est chargée de résoudre en temps réel les indéterminismes qui existent encore.

- **Coordination des sous – systèmes**, la fonction principale de ce niveau est de s'occuper de la commande en temps réel des sous-systèmes de l'atelier. Il s'agit en particulier de la gestion du système de transport permettant de faire la liaison entre les diverses cellules.

- **Commande locale**, c'est à ce niveau qu'est implémentée la commande en temps réel des machines, etc..., le plus souvent au travers d'automates programmables et de commandes numériques.

**I.8.5. Démantèlement ou évolution du système**, cette étape peut être considérée comme la fin du cycle de vie d'un atelier flexible. Généralement elle intervient lorsque les perturbations au niveau du marché sont si importantes que le système implanté n'est plus capable de répondre efficacement aux besoins de la production, ou bien on modifiera le système afin de l'adapter à la nouvelle production, ou bien on le démantèlera et on mettra en place un nouveau projet de conception d'un système de production plus actualisé.

## **I.9. Conclusion**

Un atelier flexible peut être vue comme un système à évènements discrets. De plus, son architecture distribuée met en jeu des problèmes de parallélisme, de concurrence et de synchronisation, les réseaux de Petri et donc, de par leur nature à traiter ces types de problèmes et sont adaptés à la spécification, à la modélisation, à la validation et à la mise en œuvre d'un atelier flexible. Nous allons voir dans le chapitre qui suit les notions de base et comment utiliser les réseaux de Petri pour la modélisation. Dans la suite de ce travail, lorsque nous aborderons les problèmes de la modélisation et d'optimisation des temps, nous nous limiterons au cas d'ateliers flexibles.



# Réseaux de Petri

### II.3.3. Conflit

Deux transitions sont en conflit si le franchissement de l'une rend l'autre infranchissable [Laf 91]. Dans l'exemple donné par la Fig II.6, les transitions  $t_1$  et  $t_2$  sont en conflit et il faut faire le choix de la transition à franchir. Donc on distingue :

•**Conflit structurel** : Si et seulement si deux transitions ont au moins une place commune en entrée comme le montre la Figure II.6.a. Il y a conflit effectif s'il y a existence de conflit structurel et si pour un marquage  $M_i$ , le nombre de marques dans la place d'entrée est inférieur au nombre de transitions validées pour ce marquage comme on le voit dans la Figure II.6.b.

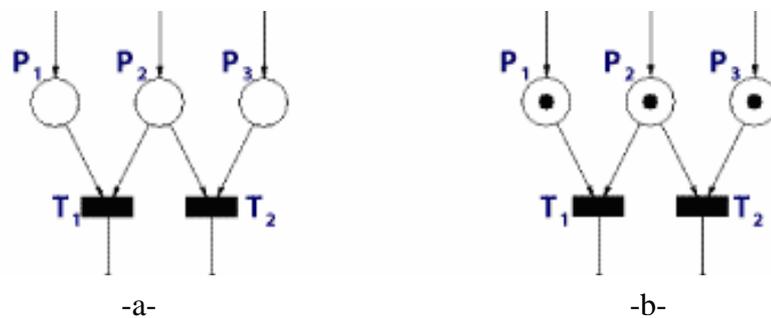


Figure II.6 : Conflit structurel et effectif

•**Conflit effectif** : Dans ce cas, il y a un choix à faire pour le franchissement des transitions; le franchissement d'une des transitions en conflit peut alors annuler la possibilité de franchir les autres transitions. Les transitions  $T_1$  et  $T_2$  étant en conflit effectif, le franchissement de la transition  $T_1$  (respectivement  $T_2$ ) annule la possibilité de franchir la transition  $T_2$  (respectivement  $T_1$ ).

## II.4. Principales propriétés

Elles peuvent être classées en deux groupes [Dav et All 89], [Mur 89], [Bra 82]:

- (i) Les propriétés dynamiques,
- (ii) Les propriétés structurelles.

### II.4.1. Les propriétés dynamiques

*a/ Réseau borné (bornitude)* : 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).

*b/ Propriétés de vivacité*: Un RdP marqué  $(R, M_0)$  est vivant si et seulement si, pour tout marquage accessible  $M \in M_0^*$ , et pour toute transition  $t$ , il existe une séquence de

franchissement qui contient  $t$ . La vivacité d'un réseau garantit le franchissement de toute transition quelque soit le marquage atteint. La propriété de vivacité est une propriété forte, souvent difficile à vérifier [Mur 89], [Laf 91].

*c/ Blocage* : Un blocage est un marquage tel qu'aucune transition n'est validée.

*d/ Etat d'accueil* : Un RdP a un état d'accueil  $M_a$  pour un marquage initial  $M_0$  si pour tout marquage accessible  $M_i \in M_0^*$ , il existe une séquence de franchissement (s) tel que  $M_a$  est accessible de  $M_i$  en franchissant (s). Le réseau est réinitialisable pour un marquage initial  $M_0$  si  $M_0$  est un état d'accueil.

*e/ Propreté* : Un réseau de Petri est propre s'il est réinitialisable

#### II.4.2. Les propriétés structurelles

Si l'évolution du marquage d'un RdP ne présente pas de situation ou état de blocage, des invariants [Ham 05] permettent de caractériser certaines propriétés des marquages accessibles et des transitions franchissables quelque soit l'évolution du marquage du RdP.

Il existe deux types d'invariants (aussi appelés semi flots) dans un RdP [Dav et Alla 92], les invariants de marquage (notés également P- invariant) et les invariants de franchissement (notés également T- invariant).

- **Définition 1 (P- invariant)**

Les invariants de marquage, appelés P- invariant, ou encore P- semi flots, illustrent la conservation du nombre de jetons dans un sous ensemble de places du RdP. Un vecteur, noté  $Y$ , de dimension égale au nombre de places du RdP est un P- invariant si et seulement s'il vérifie l'équation suivante :

$$Y^t \times W = \vec{0}, \quad Y \neq \vec{0} \quad (\text{Eq.II.2})$$

L'ensemble des places pour lesquelles la composante associée dans le P- invariant est non nulle, est appelée la *composante conservative* du RdP. Où  $W$  correspond à la matrice d'incidence du RdP.

- **Définition 2 (T-invariant)**

Un vecteur non nul d'entiers  $X$  est un T- invariant, ou encore T- semi-flots du RdP si et seulement s'il vérifie l'équation suivante :

$$W \times X = 0 \quad (\text{Eq.II.3})$$

D'après l'Eq.II.1 le franchissement à partir d'un marquage  $m_i$  d'une séquence dont le vecteur caractéristique est  $X$  ramène le graphe au même marquage  $m_k = m_i$ . L'ensemble des transitions pour lesquelles la composante associée dans le T- invariant est non nulle est appelé le support du T- invariant. Un T- invariant correspondant à une séquence de franchissement réalisable est appelé *composante répétitive*.

## II.5. Réseaux de Petri Particuliers

**II.5.1. Graphe d'états :** Un RdP non marqué ou marqué est un graphe d'états [Dec 04 ] si et seulement si toute transition a exactement une place d'entrée et une place de sortie.

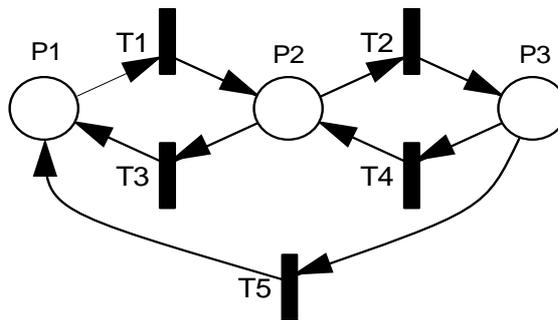


Figure II.7 : Graphe d'état marqué

**II.5.2. Graphe d'événements :** Un RdP est un graphe d'événement si et seulement si chaque place possède exactement une seule transition d'entrée et une seule transition de sortie. Un graphe d'événements est parfois appelé graphe de transitions.

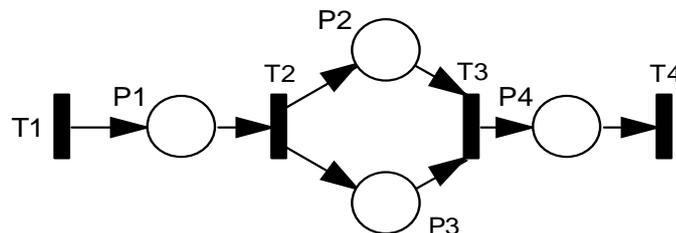


Figure II.8 : graphe d'événements

**II.5.3. Réseaux de Petri à choix libre :** Un RdP est à choix libre est un réseau dans lequel pour tout conflit  $[P_i, \{T_1, T_2, \dots, T_n\}]$  aucune des transitions  $T_1, T_2, \dots, T_n$  ne possède aucune autre place d'entrée que  $P_i$ .

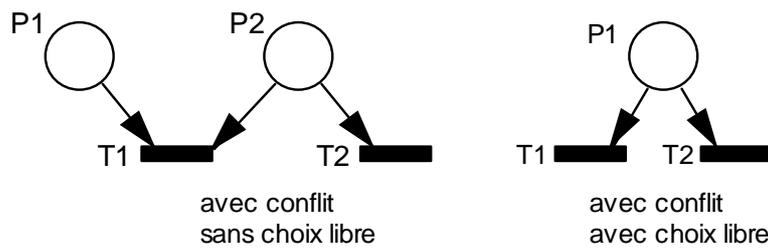


Figure II. 9: Réseaux de Petri à choix libre

**II.5.4. Réseaux de Petri simple :** Les réseaux de Petri simples sont des RdP ordinaires tels que chaque transition a au plus une place d'entrée qui peut être reliée à d'autres transitions, (Toute transition appartient à un seul conflit au plus).

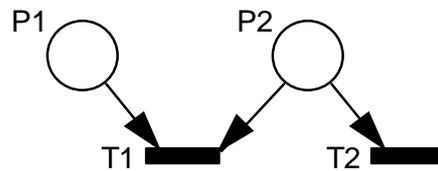


Figure II.10 : Réseaux de Petri simple

**II.5.5. Réseau de Petri Pur et Réseau de Petri Impur :** Dans un RdP, une transition est dite pure si elle ne possède aucune place qui est à la fois place d'entrée et place de sortie. Si toutes les transitions du RdP sont pures le RdP est pur. Dans un RdP une transition est dite impure si elle possède une place qui est à la fois place d'entrée et place de sortie. Si les transitions du RdP sont impures le RdP est impur.

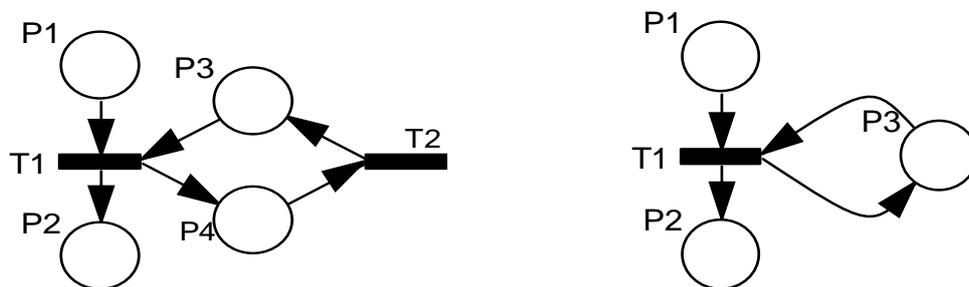


Figure II.11 : Réseau de Petri Pur et Réseau de Petri Impur

**II.6- Différents modèles des réseaux de Petri (RdPs)**

La variété et complexité des comportements des systèmes mettent en évidence plusieurs types des RdPs [Dav et All 89] énumérés ci-après.

### II.6.1. Réseaux de Petri ordinaire

La structure d'un réseau de Petri est un quadruplet  $R = (P, T, a, b)$  où :  $P$  est un ensemble de places,  $T$  est un ensemble de transitions,  $a \subseteq P \times T$  est une relation d'incidence avant,  $b \subseteq T \times P$  est une relation d'incidence arrière.

### II.6.2. 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. Il y a principalement deux façons de modéliser la temporisation soit :

#### II.6.2.1. 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. 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. Ceci est représenté sur la Figure II.12. Lorsque la transition  $t_1$  est franchie, une marque est déposée dans la place  $P_1$  et reste indisponible pendant un temps  $d$  quand cette marque devient disponible, la transition  $t_2$  devient validée. Quand elle sera franchie, une marque indisponible sera déposée dans  $P_2$ .

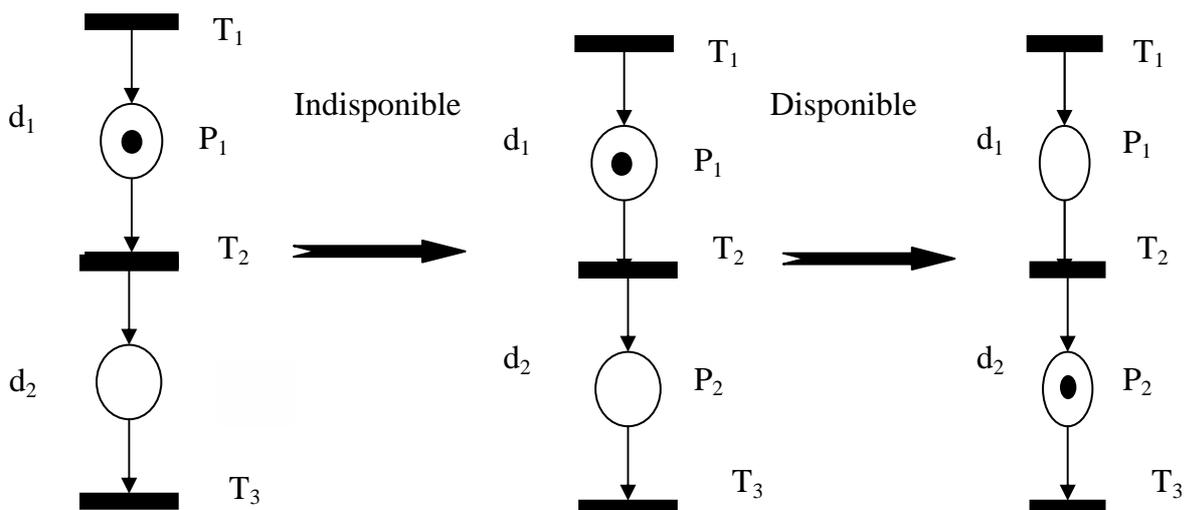


Figure II.12 : Temps associé à une place

### II.6.2.2. RdP T-temporisé

Pour chaque transition  $T_i$  est associée une temporisation. Une marque peut avoir deux états. Elle peut être **réservée** pour le franchissement d'une transition  $T_j$  ou elle peut être **non réservée**. Ceci est représenté dans la figure II.13. Lorsque la transition  $T_1$  est franchie, une marque est déposée dans la place  $P_1$ , ce qui entraîne la validation de la transition  $T_2$  puis son franchissement. A l'instant où le franchissement est effectué la marque nécessaire à ce franchissement est **réservée**. Lorsque la durée  $d_2$  est écoulée depuis la décision de franchissement, la transition est effectivement franchie. La marque réservée pour le franchissement est alors retirée de  $P_1$  et une marque **non réservée** est déposée dans  $P_2$ .

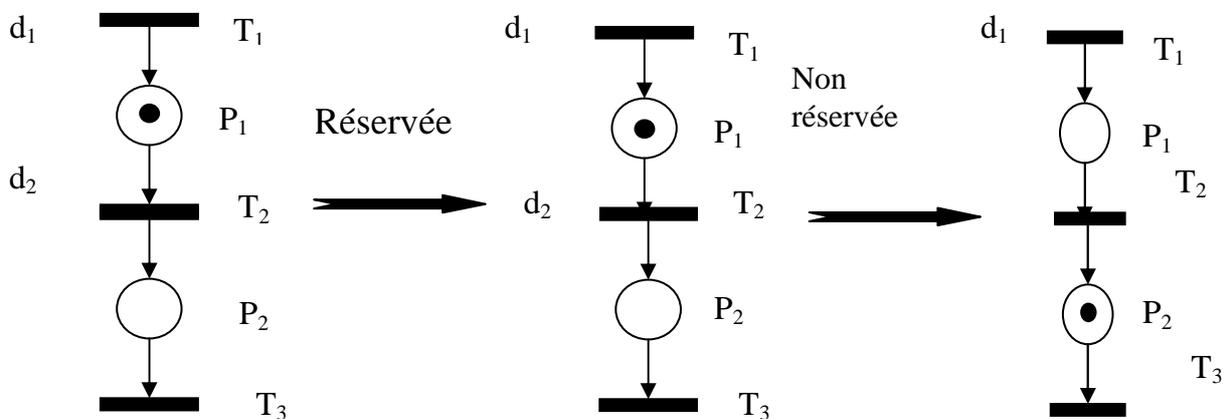


Figure II.13 : Temps associé à une transition

### II.6.3. Réseaux de Petri stochastique

Lorsqu'une durée fixe est associée à chaque place ou à chaque transition du réseau, il est appelé RdP temporisé, cependant il existe des phénomènes qui ne peuvent pas être bien modélisés avec des durées constantes, cette durée peut être modélisée par une variable aléatoire cette approche est appelée la modélisation par les RdP stochastiques [Flo 80]. Un temps aléatoire est associé au franchissement d'une transition. L'hypothèse la plus couramment utilisée est que les temporisations sont distribuées selon une loi exponentielle. A tout RdP stochastique on peut associer une chaîne de Markov. Les réseaux de Petri stochastiques sont donc des réseaux de Petri où les durées de sensibilisation associées aux transitions sont définies par de telles distributions afin de pouvoir construire un processus Markovien équivalent puis analyser les comportements du réseau.

### II.6.3.1. Définition et fonctionnement [Flo 85]

Un RdPS est un RdP temporisé doté d'une mesure de probabilité sur l'espace des trajectoires; en d'autres termes, les séquences de franchissement sont mesurables en considérant un espace aléatoire. Plus formellement, un RdPS est un quintuple  $\langle P, T, Pre, Post, C \rangle$ , ou  $P$  et  $T$  : Désignent respectivement les ensembles finis de places et de transitions ( $P \neq \Phi, T \neq \Phi$ ).  $Pre$  et  $Post : P \times T \rightarrow \mathbb{N}$  sont respectivement les applications d'incidence arrière et avant.

Soit  $W = Pre - Post$ , la matrice d'incidence définie par les applications  $Pre$  et  $Post$ .

$C = \{\lambda_i \in \mathbb{R} / \lambda_i \text{ est le taux de franchissement de la transition } t_i\}$ .

### II.6.3.2. Durée de sensibilisation stochastique [Flo 85]

Au lieu de prendre toutes les valeurs d'un intervalle  $([\theta_{min}, \theta_{max}])$  on peut supposer que la durée de franchissement est une variable stochastique  $\theta$  avec une distribution de probabilité exponentielle :  $Pr[\theta \leq t] = 1 - e^{-\lambda t}$  La fonction  $Pr\theta(t)$  décrit la probabilité pour que le franchissement ait lieu avant  $t$  c'est-à-dire pour que la durée de sensibilisation soit inférieure à  $t$ .

On en déduit que la valeur moyenne de la durée de sensibilisation est :

$$\bar{\theta} = \int_0^{\infty} (1 - Pr_{\theta}(t)) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} ; \quad (\text{Eq.II.4})$$

$\lambda$  est appelé taux de transition.

### II.6.3.3. Processus stochastiques [Ajm 90]

Un processus stochastique  $\{x(t), t \in T\}$  est une famille de variables aléatoires définies sur un même espace de probabilité, à valeurs dans un même espace d'état  $E$ , indexées par le paramètre  $t \in T \subseteq \mathbb{R}$ ;  $t$  désigne très souvent une date, lorsque  $T$  est discret par ex.  $t_1, \dots, t_n$ ;  $t$  désigne une date (instant quelconque), lorsque  $T$  est continu. La distribution de probabilité d'un processus stochastique est donnée par les fonctions de densité de ses variables aléatoires  $x(t)$ . Plusieurs classes de processus stochastiques existent, parmi elles : les processus markoviens.

### II.6.3.4. Processus de Markov

Un processus stochastique  $X$  est un processus de Markov, si et seulement si il vérifie la propriété suivante:  $\forall n \in N, \forall t_0 < t_1 \dots < t_n < t, \forall (x_1, x_2, \dots, x_n)$

$$Pr(X_t \leq x / X_n = x_n, \dots, X_0 = x_0) = Pr(X_t \leq x / X_n = x_n); \quad (\text{Eq.II.5})$$

Cette propriété traduit le fait que l'évolution du processus est entièrement déterminée par son état présent, c'est-à-dire qu'il est "sans mémoire" de ses états antérieurs. Un processus (ou chaîne) de Markov est dit (e) homogène si et seulement si:

$$Pr(X_t \leq x / X_n = x_n) = Pr(X_{t-n} \leq x / X_0 = x_n); \quad (\text{Eq.II.6})$$

Cette probabilité ne dépend pas donc que de l'écart  $t - tn$ . La probabilité que la chaîne soit dans l'état  $i$  à l'instant  $t$  est  $\Pi_i(t)$ . On notera  $\Pi(t)$  le vecteur ligne correspondant, ( $\Pi(0)$  est la distribution initiale de la chaîne). Le temps passé par une chaîne de Markov dans un état donné  $i$ , appelé temps de séjour ou de maintien dans l'état  $i$ , suit une **loi exponentielle** pour les chaînes de Markov à temps continue.

#### a- Chaîne de Markov à temps discret

Une chaîne de Markov à temps discret (Discret Time Markov Chain, DTMC) est entièrement déterminée par sa distribution initiale  $\Pi_0$  et la matrice stochastique  $P$ , appelée matrice des probabilités de transition de la chaîne:

$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{1m} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{2m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ P_{m1} & P_{m2} & P_{m3} & P_{mm} \end{pmatrix}; \quad (\text{Eq.II.7})$$

Tel que:

$$0 \leq P_{ij} \leq 1 \quad \forall 1 \leq i, j \leq m; \quad \sum_{i=1}^m P_{ij} = 1 \quad \forall i=1, \dots, m \quad \text{ou } m \text{ est le nombre d'état de la chaîne.}$$

$P_{ij} = Pr(X(tn) = j / X = i)$ ; Nous nous intéressons beaucoup plus aux chaînes de Markov à temps continus que nous allons illustrer ci-après.

**b- Chaîne de Markov à temps continu:(Continue Time Markov Chain CTMC)**

Un processus stochastique  $\{X(t); t \geq 0\}$  à états  $0,1,2,\dots$ etc est appelé chaîne de Markov à temps continu ou à paramètre continu si la distribution conditionnelle du processus à l'instant  $t$ , connaissant son état à l'instant  $t_n$  ( $t_n < t$ ), n'est pas modifiée par la connaissance supplémentaire de ses états à des instants  $t_1, t_2, \dots, t_{n-1}$  antérieurs à  $t_n$  ( $t_1 < t_2 \dots < t_{n-1} < t_n$ ).

En notation plus formelle, ceci signifie que:

$$P(X(t)=j / X(t_n)=i_n, X(t_{n-1})=i_{n-1}, \dots, X(t_1)=i_1) = P(X(t)=j / X(<t_n)=i_n); \tag{Eq.II.8}$$

La relation ci dessus est connue sous le nom de propriétés de Markov (qu'on a déjà cité au préalable). On impose généralement aux probabilités  $P_{ij}(t)$ , la condition initiale qui est la

suivante:

$$\lim_{t \rightarrow 0} P_{ij}(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } i = j \\ 0 & \text{si } i \neq j \end{cases} ; \tag{Eq.II-9}$$

Ceci signifie que les transitions de  $i$  vers  $j$  ( $i \neq j$ ) ne se font pas de manière instantanée, mais pendant un intervalle de temps défini comme **Taux de transition**

Contrairement aux chaînes de Markov à temps discret, dans les chaînes de Markov à temps continu, on s'occupe des taux de transitions ( $\lambda$ ) plutôt que des probabilités de transitions.

Considérons maintenant les dérivées à l'origine des fonctions  $P_{ij}(t)$ :

$$P'_{ij}(0) = \lim_{t \rightarrow 0} P_{ij}(t)/t \quad P'_{ij}(0) = \lim_{t \rightarrow 0} (P_{ii}(t) - 1)/t, \text{ par la suite nous posons :}$$

$$P'_{ij}(0) = q_{ij} \quad (i \neq j) \text{ et } P'_{ii}(0) = q_{ii}(0)$$

Ces quantités sont appelées taux de transitions du processus considéré. L'équivalent pour les CTMC, de la matrice  $P$  des DTMC est la notion de générateur.

- **Générateur d'une CTMC**

Soit  $X$  une chaîne de Markov à temps continu homogène, à espace d'état fini, de matrice  $P(t)$ , qui est dérivable à droite en 0.

La matrice  $Q = \frac{dP(0)}{dt}$  est appelée générateur

On a donc  $\frac{dP(t)}{dt} = Q.P(t)$  d'où  $P(t) = e^{Q(t)}$

Ainsi une CTMC est entièrement défini par son générateur  $Q$  et sa distribution initiale. On définit la matrice des taux de transition ( ou générateur ) comme suit:

$$Q = \begin{pmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} \dots & q_{1m} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} \dots & q_{2m} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ q_{m1} & q_{m2} & q_{m3} \dots & q_{mm} \end{pmatrix} ; \quad (\text{Eq.II.10})$$

L'élément  $q_{ij}$  ( $i \neq j$ ) est égal au poids de l'arc allant de l'état  $i$  vers l'état  $j$ , et représente le taux de transition d'un état vers un autre soit :  $q_{ij} = \lambda_{ij}$ . L'élément diagonal  $q_{ii} = -\sum \lambda_{ik}$  ; représente les probabilités dans la ligne  $i$ .  $q_{ij}$  s'interprète comme la vitesse de transition de l'état  $i$  vers l'état  $j$ . Après avoir construit le générateur  $Q$  du processus markovien, la résolution du système linéaire homogène permet d'obtenir les probabilités d'états en régime stationnaire grâce à la relation suivante :

$$\pi^* Q = 0 ; \quad (\text{Eq.II.11})$$

Avec  $\pi$  : vecteur ligne des probabilités des états.  $\sum \pi_i = 1$  pour  $i=1, m$ . Les  $\pi_i$  représentent les probabilités d'états.

### II.6.3.5. Calcul des paramètres de performance [ Sal 99]

A partir des probabilités  $\pi_i$ , nous pouvons déduire trois résultats importants :

- La fréquence moyenne de franchissement des transitions  $T_i \in T$  est considérée comme un nombre moyen de tir de chaque transition telle que :

$$f_i^* (t_i) = \sum \pi_k \cdot \lambda_i (M_k) ; \quad (\text{Eq.II.12})$$

Tels que  $T_i$  est franchissable à partir de  $M_k$

$\lambda_i (M_k)$  est le taux de franchissement de la transition  $t_i$  dans  $M_k$

- Les marquages moyens des places  $P_i \in P$  en régime stationnaire

$$M^*(P_i) = \sum \pi_i M_i(p) ; \quad (\text{Eq.II.13})$$

$M_i(p)$  est le nombre de marquages dans la place  $p$  pour le marquage  $M_i$

- Les temps moyens de séjour des marques dans les places  $P_i \in P$  en régime permanent c'est-à-dire  $\theta^*(P_i)$  dont l'expression est donnée par:

$$\theta^*(P_i) = \frac{M^*(P_i)}{\text{Post } i . f^*}; \quad (\text{Eq.II.14})$$

Appelé la formule de Little.

Où:  $\text{Post } i$  est la  $i$ ème ligne de la matrice  $W^+$ .

$f^*$  Fréquence moyenne de franchissement.

$M^*$  est le vecteur des nombres moyens de marques.

## II.7. Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet de la présentation des notions de bases des RdP, ces derniers considérés comme un outil prépondérant tant par sa diversité de modélisation que par l'outil technique qui lui est associé (simulation statistique connue également sous le nom simulation Monte-Carlo) voir l'annexe 2. On note que le modèle RdPS offre, non seulement, un puissant outil pour la formalisation des propriétés des systèmes réels, mais aussi il représente un puissant modèle pour l'évaluation des paramètres de performance aussi bien qualitatifs que quantitatifs. Alors parmi les modèles cités dans ce chapitre nous avons jugé utile de nous aligner avec cette orientation et de retenir les réseaux de Petri stochastiques et temporisés comme support de modélisation et d'analyse pour notre application qui concerne l'étude d'un Job- Shop, détaillée dans le chapitre suivant.

Les RdP pour la modélisation et l'analyse  
d'un atelier flexible

» Chaque poste de fraissage (M2 et M4) reçoit des blocs bruts rectangulaires.

- Le robot **GE P50** de chaque cellule partage ses ressources pour charger et décharger les pièces.
- Un contrôleur logique programmable **PLC** est utilisé pour coordonner et contrôler tous les mouvements des composants individuels dans le système.

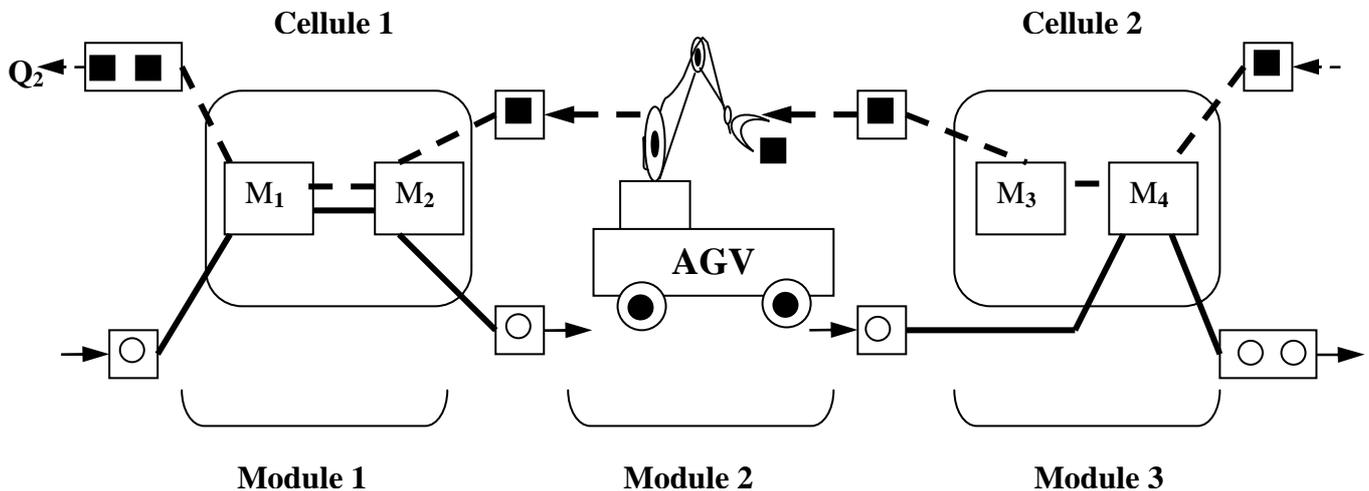


Figure III.1: Présentation générale de l'atelier

Deux produits  $Q_1$  et  $Q_2$  sont fabriqués et leurs gammes de fabrication sont indiquées dans la figure III.1. Nous décomposons le système en trois modules :

Le module 1 correspond à la cellule 1 ( $C_1$ ), le module 2 à l'AGV et le module 3 à la cellule 2 ( $C_2$ ).

### III.2.2. Cycle de fonctionnement

Le cycle de fonctionnement de ce système se décompose en deux étapes: L'étape d'initialisation et l'étape d'usinage.

Au départ, le chariot (AGV) est vide et disponible pour être chargé de  $Q_1$  à partir de la sortie de la cellule 1 comme ce produit il sera usiné par deux machines  $M_1$  et  $M_2$ , donc le chariot doit attendre dans son état initial jusqu'à ce que  $Q_1$  soit à la sortie de  $C_1$ . Le chariot une fois chargé, se déplace dans le sens contraire des aiguilles d'une montre. Il suit le chemin 1 et se déplace vers la cellule 2, décharge  $Q_1$  à l'entrée de  $C_2$ , puis il suit le chemin 2, pour charger  $Q_2$  de la sortie de  $C_2$ , une fois  $Q_2$  est chargé ; le chariot suit le chemin 3 et décharge  $Q_2$  à la sortie de  $C_1$  et retourne à son état initial et se prépare pour refaire le même cycle. Là on peut dire que dans un cycle complet on aura deux produits finis  $Q_1$  et  $Q_2$  au même temps. Les chemins suivis par le chariot sont montrées dans la Figure III.2 et définissent l'étape

d'initialisation. Une autre phase d'initialisation est possible, elle consiste à déplacer d'abord Q<sub>2</sub> puis Q<sub>1</sub>. Dans ce cas le chariot est disponible devant la cellule C<sub>2</sub> charge Q<sub>2</sub> suit le chemin 3 décharge Q<sub>2</sub> en C<sub>1</sub>, puis suit le chemin 1 charge Q<sub>1</sub>, et se déplace vers C<sub>2</sub> décharge Q<sub>1</sub> en C<sub>2</sub> et reprend son état initial pour refera le même cycle. Ce problème de priorité (conflit) il saura analysé et résolu dans la suite de notre travail. La simulation et l'analyse par les réseaux de Petri prennent en charge le système après la phase d'initialisation.

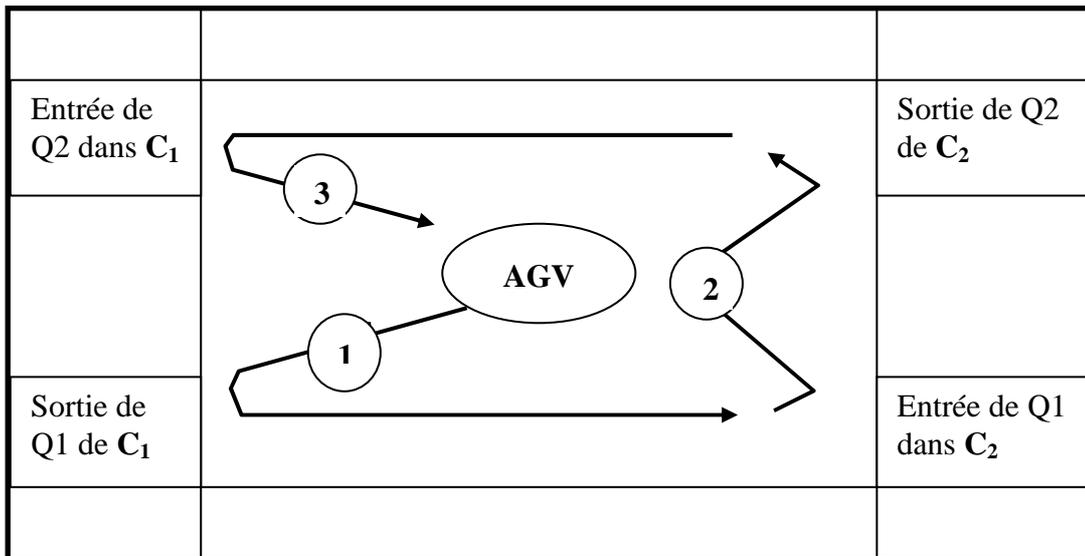


Figure III.2: Positionnement du chariot dans une étape d'initialisation

### III.2.3. Conditions particulières de fonctionnement

- Les temps des opérations (fraisage, perçage) sont considérés constants.
- Les temps d'entrée des deux produits Q<sub>1</sub> et Q<sub>2</sub> dans les deux cellules sont synchronisés.
- Chaque ressource de transport prend en charge une seule pièce.
- Le flux des palettes entrant dans les deux cellules n'est pas continu.
- La capacité des stocks de sortie de chaque cellule est illimitée.
- Chaque cycle de fonctionnement les stocks des palettes d'entrée de chaque cellule contiennent une palette.

### III.3. Modélisation de l'atelier

L'atelier flexible peut être décomposé naturellement dans les parties suivantes (modules) :

**Module 1** : correspond à la cellule 1, dont on modélise les macro places P<sub>3</sub>, P<sub>6</sub>, (Opérations de perçage), P<sub>4</sub>, P<sub>5</sub> (Opérations de fraisage).

**Module 2** : système du convoyeur, circulation de L'AGV dans l'atelier entre les deux cellules.

**Module 3** : correspond à la cellule 2, nous nous intéressons à la modélisation des macro places  $P_{13}$  (Opération de perçage),  $P_{11}$ ,  $P_{12}$  (opérations de fraisage).

**III.3.1. Modélisation des deux cellules ( $C_1$  et  $C_2$ )**

Les modèles des modules 1 et 3 sont similaires voir figure III.3 (a) et (b), seulement le produit  $Q_1$  dans la cellule 2 il ne sera pas usiné par la machine  $M_3$ . analysons le module 1. Les places  $P_7$  et  $P_8$  sont des places d'interface et représentent les stocks d'entrée et de sortie du module 1. Les transitions  $t_1$  et  $t_4$  sont des transitions d'entrée, et  $t_2$  et  $t_3$  des transitions de sortie. Les places  $P_1$  et  $P_2$  contiennent un nombre de jetons égal au nombre de palettes disponibles pour la fabrication de  $Q_1$  et  $Q_2$ . Dans ces deux modules on considère que les temps des opérations de perçage et de fraisage sont connus, et le temps de passage d'une opération à l'autre est immédiat, donc les réseaux de Petri qui répond parfaitement pour la modélisation de ces modules, du fait qu'on peut associer un temps déterministe à chaque transition et à chaque place, sont les **réseaux de Petri temporisés**. Il est noté que les places  $P_3, P_6, P_4, P_5, P_{11}, P_{12}$  et  $P_{13}$  sont modélisées indépendamment par la suite.

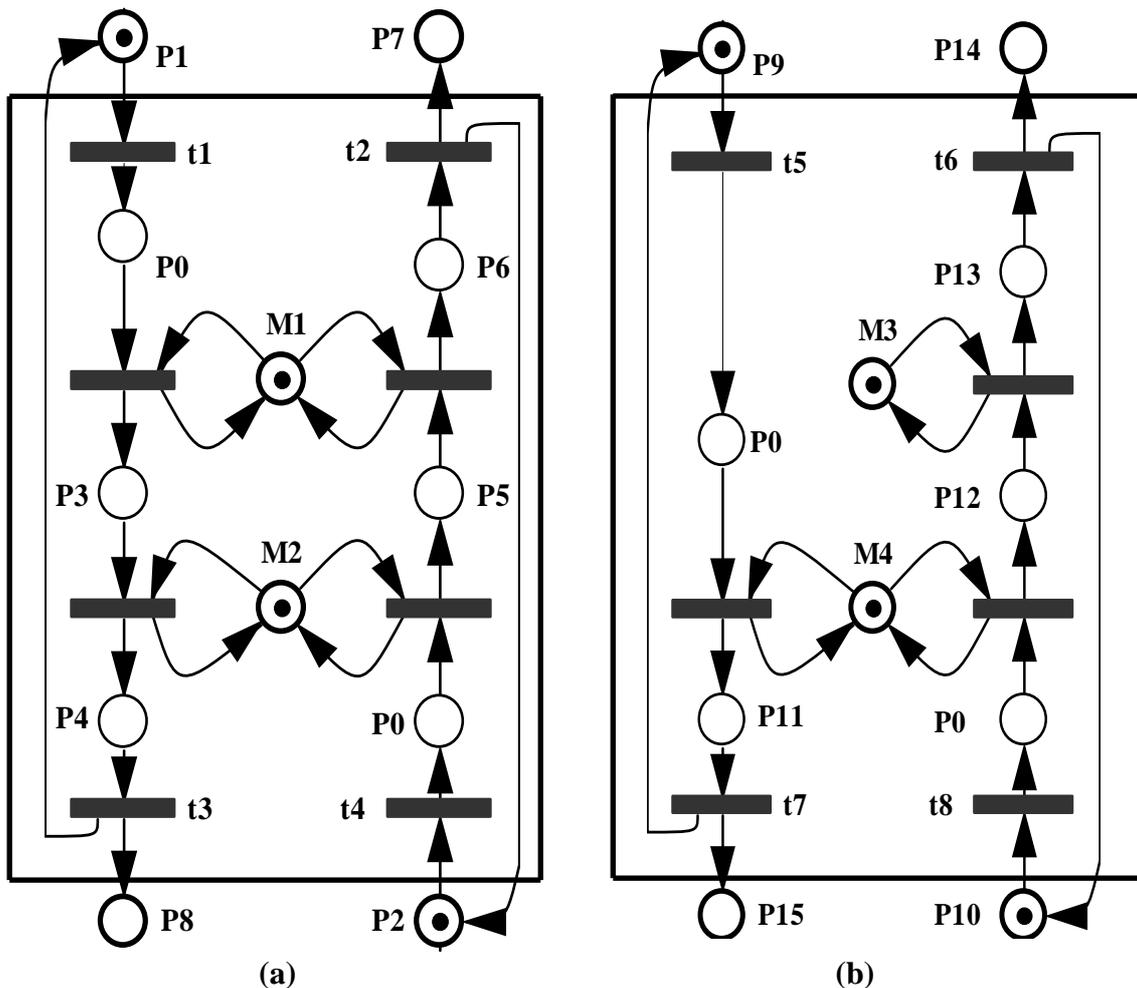


Figure III.3 : Modèles RdP des deux cellules  
 (a) C1 (Module 1)  
 (b) C2 (Module 3)

- la signification des places et transitions des deux modules

A / tableau III.1 : les places et transitions du module 1

Place et transition	Désignation
$P_0$	Places de symétrie
$P_1$	Nombre de palettes disponibles pour fabriquer $Q_1$
$P_2$	Nombre de palettes disponibles pour fabriquer $Q_2$
$P_3$	Opération de perçage de $Q_1$ par $M_1$
$P_4$	Opération de fraisage de $Q_1$ par $M_2$
$P_5$	Opération de fraisage de $Q_2$ par $M_2$
$P_6$	Opération de perçage de $Q_2$ par $M_2$
$P_7$	Stock de sortie de $Q_2$ de la cellule 1
$P_8$	Place d'interface du module 1
$M_1$	Machine $M_1$ disponible
$M_2$	Machine $M_2$ disponible
$t_1, t_4$	Transitions d'entrée
$t_2, t_3$	Transitions de sortie

B / Tableau III.2 : les places et transitions du module 3

Place et transition	Désignation
$P_9$	Nombre de palettes disponibles pour fabriquer $Q_1$
$P_{10}$	Nombre de palettes disponibles pour fabriquer $Q_2$
$P_{11}$	Opération de fraisage de $Q_1$ par $M_4$
$P_{12}$	Opération de fraisage de $Q_2$ par $M_4$
$P_{13}$	Opération de perçage de $Q_2$ par $M_3$
$P_{14}$	Place d'interface du module 3
$P_{15}$	Stock de sortie de $Q_1$ de la cellule 2
$M_3$	Machine $M_3$ disponible
$M_4$	Machine $M_4$ disponible
$t_5, t_8$	Transitions d'entrée
$t_6, t_7$	Transitions de sortie

### III.3.2. Modélisation du système du convoyeur (AGV)

Il est observé que le chariot AGV se déplace de sa position initiale et retourne en cycle complet. Les opérations de base du chariot 'se déplace' et 'attente'. Au cours de ces évènements le temps de passage d'une place à l'autre est indéterminé (aléatoire), donc les réseaux de Petri qui répond parfaitement pour la modélisation du système de convoyeur (AGV), du fait qu'on peut associer une probabilité à la transition désirée sont les **réseaux de Petri stochastiques**. Le modèle RdP du module 2 est donné dans la figure III.4.

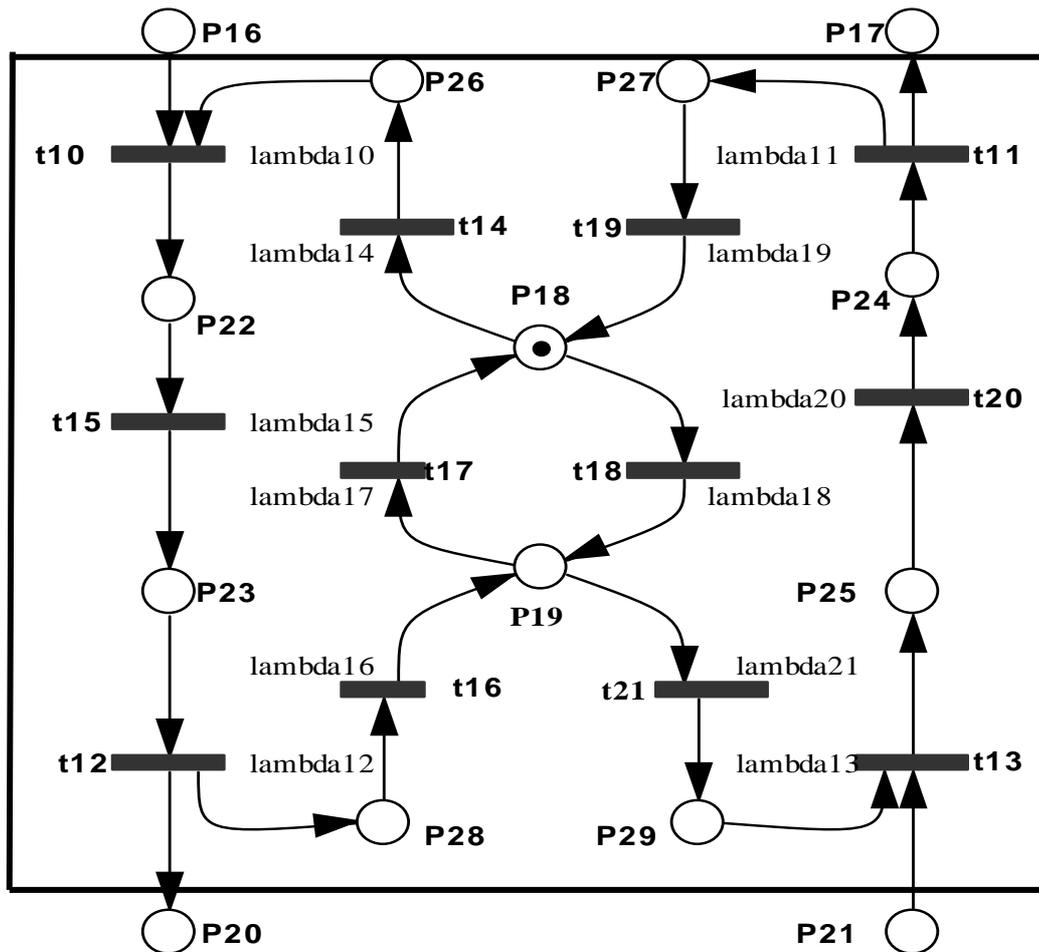


Figure III.4: Modélisation du système du convoyeur (AGV) par les Réseaux de Petri stochastiques

Analysons le modèle du module 2, les places  $P_{16}$ ,  $P_{17}$ ,  $P_{20}$  et  $P_{21}$  sont des places d'interface du module. Les transitions  $t_{10}$  et  $t_{13}$  sont des transitions d'entrée qui représentent le chargement des produits sur l'AGV, la transition  $t_{15}$  (resp.  $t_{20}$ ) représente le déplacement d'un produit  $Q_1$  (resp.  $Q_2$ ) de la cellule 1 vers la cellule 2 (resp. de la cellule 2 vers la cellule 1) à l'aide de l'AGV. Les places  $P_{18}$  et  $P_{19}$  indiquent les positions de repos (attente) de l'AGV. La transition  $t_{14}$  représente le déplacement de l'AGV de la position  $P_{18}$  vers les stocks de sortie

de la cellule 1 et  $t_{19}$  représente le déplacement de l'AGV de la sortie de la cellule 1 vers la position  $P_{18}$ . Les transitions  $t_{16}$  et  $t_{21}$  sont similaires à  $t_{14}$  et  $t_{19}$ . Les transitions  $t_{17}$  et  $t_{18}$  représentent les déplacements de l'AGV entre  $P_{18}$  et  $P_{19}$ . La signification de principales places et transitions est montrée dans les tableaux III.3 et III.4.

- **Tableau III.3 : La signification des principales places du module 2**

place	désignation
$P_{16}, P_{17}, P_{20}$ et $P_{21}$	Sont des places d'interface du module 2, elles représentent les stocks intermédiaires
$P_{18}, P_{19}$	Positions de repos de l'AGV (attente)
$P_{22}$	Chariot chargé par $Q_1$
$P_{23}$	Chariot prêt à être déchargé
$P_{24}$	Chariot prêt à être déchargé
$P_{25}$	Chariot chargé par $Q_2$
$P_{26}$	Chariot disponible au stock de sortie de $Q_1$ de la cellule 1
$P_{27}$	Chariot disponible au Stock d'entrée de $Q_2$ dans la cellule 1
$P_{28}$	Chariot disponible au Stock d'entrée de $Q_1$ dans la cellule 2
$P_{29}$	Chariot disponible au Stock de sortie de $Q_2$ de la cellule 2

- **Tableau III.4 : Signification des transitions du module 2**

transition	Désignation
$t_{10}$	Chargement de $Q_1$ sur l'AGV
$t_{11}$	Déchargement de $Q_2$ de l'AGV
$t_{12}$	Déchargement de $Q_1$ de l'AGV
$t_{13}$	Chargement de $Q_2$ sur l'AGV
$t_{14}$	Déplacement de l'AGV de la position $P_{18}$ vers les stocks de sortie de la cellule 1
$t_{15}$	Déplacement de l'AGV de la cellule 1 vers la cellule 2
$t_{16}$	Déplacement de l'AGV de sortie de la cellule 2 vers la position de repos $P_{19}$
$t_{17}, t_{18}$	Déplacement de l'AGV entre $P_{18}, P_{19}$
$t_{19}$	Déplacement de l'AGV de la sortie de la cellule 1 vers la position $P_{18}$
$t_{20}$	Déplacement de l'AGV de la cellule 2 vers la cellule 1
$t_{21}$	Déplacement de l'AGV de la position $P_{19}$ vers le stock de sortie de la cellule 2

III.3.3. Modèle réseau de Petri global de l'atelier

Le modèle réseau de Petri global est obtenu par l'union des trois modules RdP construits pour les deux cellules et le chariot (AGV) représenté dans la figure III.5.

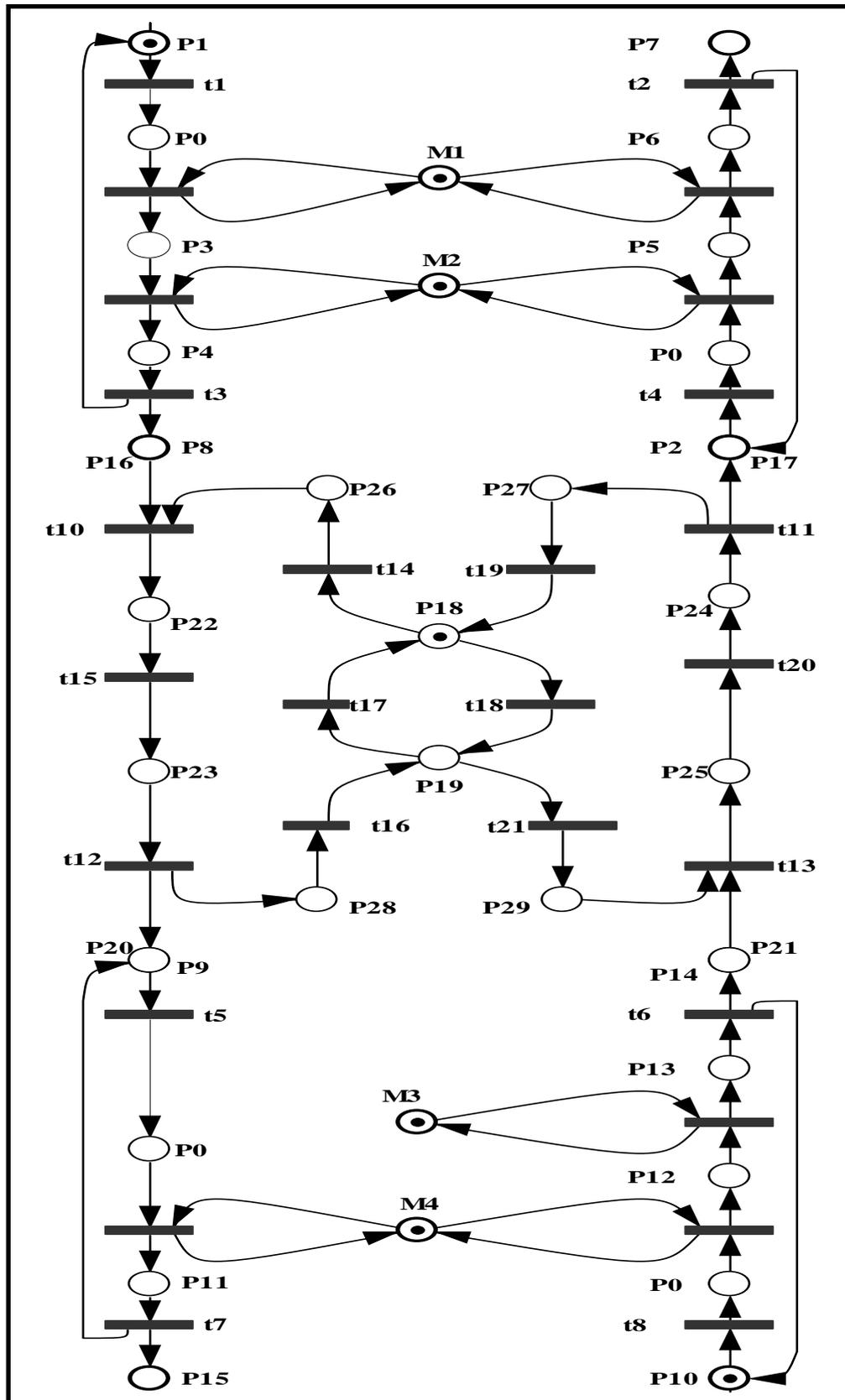


Figure III.5: Modèle réseau de Petri global de l'atelier

En fusionnant les places d'interfaces ( $P_8$  et  $P_2$ ) du module 1 avec les places d'interfaces du module 2 ( $P_{16}$  et  $P_{17}$ ) respectivement, et les places d'interfaces ( $P_9$  et  $P_{14}$ ) du module 3 avec celles du module 2 ( $P_{20}$  et  $P_{21}$ ) respectivement. Les nouvelles places obtenues par la fusion des places d'interfaces de chaque module représentent les stocks intermédiaires de chaque produit. Le cycle de fonctionnement de l'atelier est donné dans la section (III.2.2).

**III.3.4. Modélisation des macro places  $P_3$ ,  $P_6$  et  $P_{13}$**

Le perçage est la seule opération impliquée dans ce poste de travail. Nous supposons que son temps d'exécution est déterminé donc pour la modélisation de cette opération, on applique aussi les réseaux de Petri ordinaires temporisés.

Quatre places  $P'_1$ - $P'_4$ , sont nécessaires pour représenter la disponibilité de la palette à percer, opération de perçage et son achèvement. Le modèle construit est montré dans la figure III.6. Les places apparentées et transitions sont expliquées dans le tableau III.5.

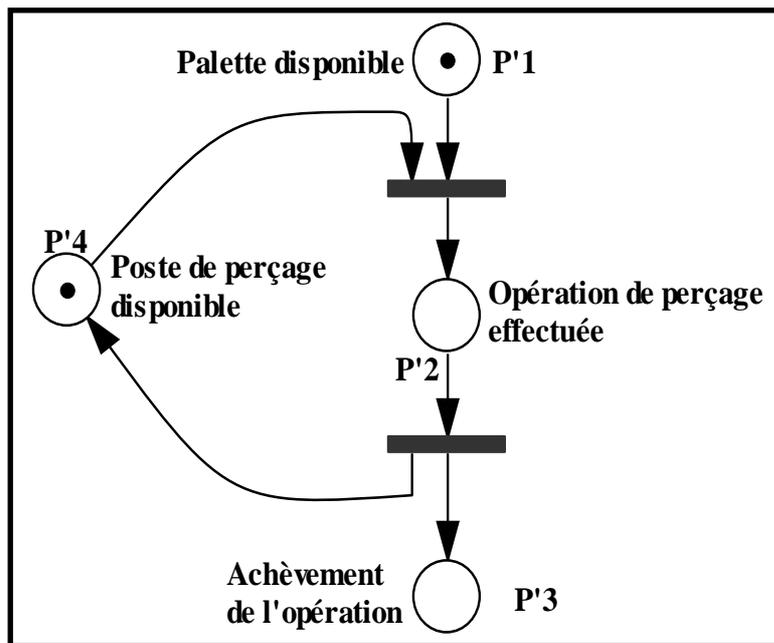


Figure III.6 : modèle RdP des postes de perçages

- **Tableau III.5 : interprétation des places du poste de perçage**

Place	Désignation
$P'_1$	Palette disponible
$P'_2$	Opération de perçage effectuée
$P'_3$	Achèvement de l'opération de perçage
$P'_4$	Poste de perçage disponible

### III.3.5. Modélisation des macro places P<sub>4</sub> et P<sub>11</sub>

P<sub>4</sub> et P<sub>11</sub>, ces places sont identiques elles représentent (la fraiseuse, robot GE P50, système de contrôle visuel par ordinateur)

Tous ces composants sont modélisés ensembles parce qu'ils sont liés au robot **GE P50**. La liste des activités pour ces composants résolus est comme suit, fraisage, déchargement, inspection, chargement des produits dans le chariot AGV. Nous supposons que les temps de ces activités sont connus donc l'approche nécessaire pour modéliser ces composants est les RdP ordinaires.

Les places représentant ces activités sont P''<sub>1</sub> et P''<sub>6</sub>. Avant de charger, une place P''<sub>1</sub>, une place P''<sub>7</sub> a besoin d'être ajoutée pour représenter la disponibilité dans le chariot ou dans le stock de sortie d'un bloc usiné. Les transitions T''<sub>1</sub> – T''<sub>6</sub>, sont à insérer entre les places comme dans la figure III.7 représentent le début ou la fin d'un événement.

Finalement, les places modélisant la disponibilité du robot GE P 50, la fraiseuse et le système de contrôle visuel, sont P''<sub>8</sub>, P''<sub>9</sub> et P''<sub>10</sub> qui sont représentées en parallèle avec les places apparentées. Les places sont interprétées dans le tableau III.6

• **Tableau III.6 : Signification des places des macro places P<sub>4</sub> et P<sub>11</sub>**

place	Désignation
P'' <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub> prêt pour le fraisage
P'' <sub>2</sub>	Q <sub>1</sub> monté sur la fraiseuse par le robot GE P50
P'' <sub>3</sub>	Opération de fraisage exécutée
P'' <sub>4</sub>	Q <sub>1</sub> usiné
P'' <sub>5</sub>	Inspection visuelle de Q <sub>1</sub>
P'' <sub>6</sub>	Tri du produit Q <sub>1</sub>
P'' <sub>7</sub>	Q <sub>1</sub> disposé dans le stock de sortie
P'' <sub>8</sub>	Robot GE P50 disponible
P'' <sub>9</sub>	Système d'inspection visuelle disponible
P'' <sub>10</sub>	Fraiseuse disponible

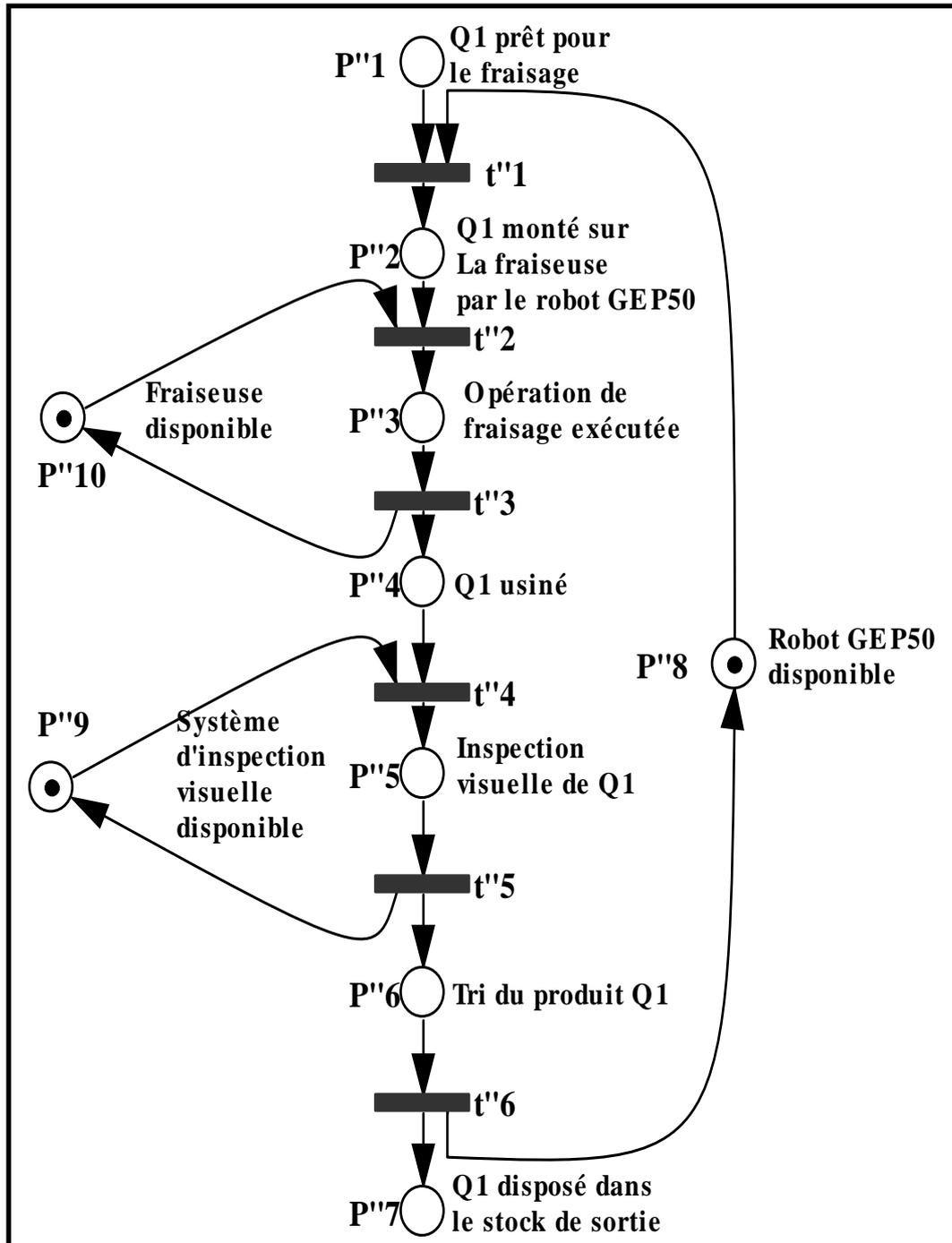


Figure III.7 : Modèle RdP des postes de fraisage

**Remarque :**

Les places P<sub>5</sub> et P<sub>12</sub> sont identiques elles sont modélisées de la même manière que P<sub>4</sub> et P<sub>11</sub>, la différence c'est que les macro places P<sub>4</sub> et P<sub>11</sub> correspondent à l'opération de fraisage du produit Q<sub>1</sub>, mais P<sub>5</sub> et P<sub>12</sub> correspondent à l'opération de fraisage du produit Q<sub>2</sub>.

**III.4. Conclusion**

Dans notre modèle, les places  $P_{18}$  et  $P_{19}$  ont plusieurs transitions de sortie. La résolution des conflits engendrés par cette situation est présentée dans le chapitre suivant.

Les Systèmes de Production sont des systèmes complexes dont l'analyse et l'évaluation de leurs performances nécessitent le recours à l'utilisation des logiciels de simulation.

Ce dernier fera l'objet d'une présentation détaillée dans le chapitre suivant.



Optimisation des temps d'attente

*Conclusion générale*



**Conclusion générale**

### Conclusion générale

Ce travail de recherche nous a permis de nous familiariser avec deux domaines en plein développement, en l'occurrence, les réseaux de Petri ainsi que leurs nombreuses utilisations et le domaine des ateliers flexibles de production.

Le besoin incessant de la civilisation moderne d'accroître productivité, flexibilité, qualité de compétitivité, a conduit à l'émergence de systèmes de production de plus en plus complexes.

Ces systèmes exhibent alors de nombreux mécanismes à haut degré de parallélisme et de synchronisation de leurs différentes activités. C'est de ce fait, notre choix s'est porté sur les réseaux de Petri temporisés et surtout stochastiques car ce modèle permet de bien formaliser les phénomènes de parallélisme et de synchronisation, et d'exprimer les durées aléatoires des activités modélisées.

Le chapitre 1 présente des notions générales associées aux systèmes flexibles de production.

Nous avons présenté dans le deuxième chapitre les différentes méthodes d'analyse et de modélisation par les réseaux de Petri.

On a ensuite donné dans le troisième chapitre une méthode de modélisation d'un système flexible de production. Dans le but de montrer comment on peut construire le modèle réseaux de Petri final du système tout en conservant les propriétés désirées (vivacité et réinitialisabilité). La décomposition du système en sous-systèmes et la composition modulaire ont été utilisées pour la construction du réseau de Petri final.

Nous nous sommes intéressés, dans le quatrième chapitre en premier lieu à la détermination des propriétés des trois modules et surtout à l'analyse et à la synthèse de celles du modèle du chariot (AGV) et à la minimisation du temps de cycle d'un système flexible de production de type job-shop pour objectif d'améliorer la productivité tout en optimisant les temps d'attente du chariot.

On a pu arriver à apercevoir la contrainte qui affecte les temps d'attente du chariot dans les places de repos. Donc on a fait augmenter les taux de chargement des produits sur le chariot pour pouvoir diminuer les temps d'attente du chariot. L'augmentation de ces taux en

réalité signifie bien de maintenir le flux de palettes de chaque produit entrant dans chaque cellule continu.

En deuxième lieu on a étudié les stocks dans le cas où ils ont une capacité limitée, on a proposé une modélisation du déchargement des stocks de sortie, pour objectif d'éviter les attentes dues aux indisponibilités des stocks (stocks pleins).

L'évaluation des performances du système retenu est rendue possible grâce à l'utilisation de l'outil réseaux de Petri de part sa diversité de modélisation que par l'outil technique qui lui est associé (simulation statique connue également sous le nom Simulation Monte-Carlo) voir l'annexe 2.

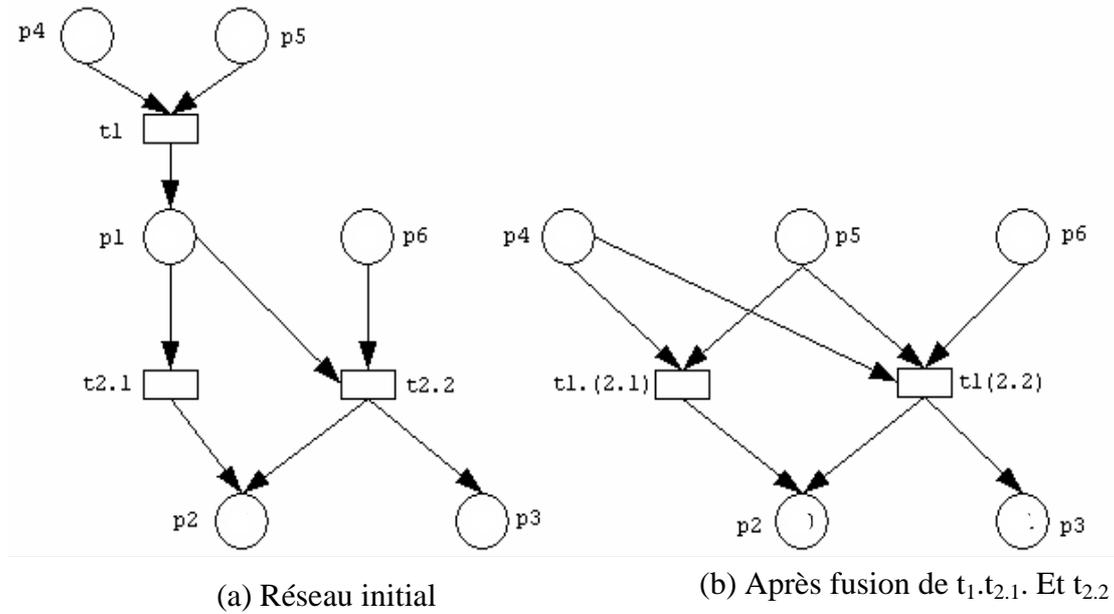
Les résultats de cette étude concernent l'amélioration des performances de l'atelier en terme de quantité et de temps. Les résultats de simulation des paramètres de temps montrent qu'ils se concordent parfaitement avec les contraintes imposées au système, comme la cadence elle est affectée par les temps d'attente.

En perspective, une des solutions qu'on envisage pour résoudre le problème des temps d'attente, est d'intégrer la modélisation des politiques de maintenance [Sag et Ben 2007] et aller plus loin aux autres fonctions comme le pilotage, afin d'obtenir un modèle global qui regroupe toutes les composantes du système industriel et avoir une démarche globale pour la surveillance en temps réel de tout le système modélisé. Pour ce faire nous proposons d'utiliser les réseaux de Petri colorés pour la modélisation. En effet les RdP colorés permettent de réduire la taille du problème. Actuellement, des recherches dans le domaine de la modélisation par les RdP colorés temporisés sont assez avancées [Dot et Pia 06], [Don et Deb 07].

*Annexes*



**Annexes**



**Fig. 1.35 : Un exemple de pré -fusion**

### b. La fusion latérale (RT3)

Deux transitions  $t_1$  et  $t_2$  sont fusionnelles latéralement si l'un des deux ensembles de conditions suivants est vérifié.

#### Ensemble 1

Il existe deux places  $p_1$  et  $p_2$  et une transition  $t^*$  telles que  $t^*$  précède  $t_1$  et  $t_2$  et :

- (i)  $t^*$  est la seule transition admette  $p_1$  et  $p_2$  comme place de sortie,
- (ii)  $t_1$  et  $t_2$  ont tous deux au moins une place d'entrée et au moins une place de sortie,
- (iii)  $t_1$  est la seule transition ayant  $p_1$  comme place d'entrée, et c'est la seule,
- (iv)  $t_2$  est la seule transition ayant  $p_2$  comme place d'entrée, et c'est la seule,
- (v)  $p_1$  et  $p_2$  ont les mêmes marquages initiaux,
- (vi) les places d'entrée de  $t_1$  et  $t_2$  ne sont places d'entrée d'aucune autre transition.

#### Ensemble 2

Il existe deux places  $p_1$  et  $p_2$  et une transition  $t^*$  telles que  $t^*$  succède à  $t_1$  et  $t_2$  et :

- (i)  $t^*$  est la seule transition qui admette  $p_1$  et  $p_2$  comme places d'entrée,
- (ii)  $t_1$  et  $t_2$  ont tous deux au moins une place d'entrée et au moins une place de sortie,
- (iii)  $t_1$  est la seule transition ayant  $p_1$  comme place de sortie, et c'est la seule,
- (iv)  $t_2$  est la seule transition ayant  $p_2$  comme place de sortie, et c'est la seule,

- (v)  $p_1$  et  $p_2$  ont les mêmes marquages initiaux,
- (vi) les places de sortie de  $t_1$  et  $t_2$  ne sont places de sortie d'aucune autre transition.

Est  $(\int_{\Omega} |f(x)| dx)^2 - I^2$  et est obtenu quand X est distribué avec la densité

$$g_X(x) = \frac{|f(x)|}{\int_{\Omega} |f(x)| dx}$$

Cependant, il est souvent possible dans la pratique de déterminer une mesure d'échantillonnage préférentiel se rapprochant de la mesure optimale et qui réduit sensiblement la variance.

*Bibliographie*



**Bibliographie**

## Bibliographie

- [Agn 00] A, Agnetis, « scheduling no-wait robotic cells with two and tree machines », European journal research, pp303-314, 2000
- [Abr 96] I, Abrudan, « Systeme flexible de fabricatie -concepte de proiectare si management», Ed. Dacia, Cluj-Napoca, 1996
- [Ada 97] 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, France, 1997
- [Ajm 90] M, Ajmone marsan, « introduction to stochastic Petri nets » 11<sup>th</sup> PN Conference, pp 2-58, Paris, june 26, 1990
- [All et Dav 98] H, Alla. R, David, « Continuous and Hybrid Petri Nets ». Journal of Circuits, Systems and Computers, pp159–188, France, 1998
- [Amo et Al 01] Lionel Amodeo, Abdellah el Moudni, Nourredine Zerhouni, «Modélisation et simplification d'un atelier de production d'ailettes», APII-JESA. Vol.35 n<sup>o</sup> 5, pp577-600, France, 2001
- [Arc 91] B, Archimède, « Conception d'une architecture réactive distribuée et hiérarchisée pour le pilotage des systèmes de production », Thèse de doctorat, université de Bordeaux, France, 1991
- [Ben 03] L, Bendada, « Application des réseaux de Petri à la gestion des systèmes de production » Mémoire de magister de l'ex INGM, Université de Boumerdès, 2003
- [Bra 82] G.W.Brams ; nom collectif de C.Andre, G.Berthelot, C.Girault, G.Memmi, G.Roucairol, J.Sifakis, R.Valette, G.Vidal-Naquet. « Réseaux de Petri : Théorie et Pratique. Tome 1 : Théorie et Analyse ; Tome 2 : Modélisation et Applications ». Editions Masson, septembre 1982
- [Bri et Al 99] Nicolae Brinzei, George Draghici, Michel Ferney, Nouredine Zerhouni, « Modélisation des systèmes de production par une approche Muti-Agents» p7, Mecanica, 1999

- [Coh 95]** Guy Coheu, «Théorie algébrique des systèmes à évènements discrets», INRIA p57, 1995
- [Chu et Al 93]** Feng Chu – Jean-Marie Proth – Vanio Marilo Savi «Ordonnancement basé sur les réseaux de Petri» INRIA n<sup>o</sup> 1960, p20, Juillet 1993
- [Cou et Al 89]** M.Courvoisier, R.Valette, A.Sahraoui, M.Combacau « Spécification and implementation techniques for multilevel control of FMS » CAPE'89, P.509-516, Tokyo, Japan, Octobr, 1989
- [Coi 93]** Philippe Coiffet, «La fonction production : nouveaux besoins, nouveaux moyens », chapitre 6, pp 97-98, Paris, 1993
- [Cra et Al 00]** Crama .Y, Kats .V, Vandeklundert .J « cyclic scheduling in robotic flow shops » Annals of operation research mathematics of industrial systems, pp 96-124, 2000
- [Cre et Gui 94]** Joël Crestel, Michel Guitton, « Design of control and simulation systems: an approach using a timed Petri Net formalization » RAPA. Vol.7 n<sup>o</sup> 4, pp437- 448, 1994
- [Dav et All 87]** David, R et Alla, H. « Continuous Petri Nets » In 8th European workshop on application and theory of Petri Nets, Saragossa-Spain ,1987
- [Dav et All 92]** René David et Hassane Alla, «Du Grafcet aux Réseaux de Petri», Edition Hermès, Paris, 1992
- [Dec 04]** J.D .Decotigni, « Grafcet et réseaux de Petri » CSEM Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique SA, pp 93-97, 2004
- [Des et Alj 95]** A. Desrochers et R.Y. Al-jaar, « Applications of Petri nets in manufacturing systems modelling, control, and performance analysis », IEEE press,1995
- [Dia 01]** Diaz. M, « Les Réseaux de Petri –Modèles fondamentaux », Hermès Science Publications : Paris, 2001
- [Din 92]** Dindeleux E, «Proposition d'un modèle et d'un système interactif d'aide à la décision pour la conduite d'atelier », thèse de doctorat, université de Valenciennes, France, 1992

**[Djo 94]** DJOUDJIN, « Réseaux de petri, modélisation et utilisation dans les ateliers flexibles » thèse de magister, université de tizi ousou, 1994

**[Don et Deb 07]** Dong Yu , Deborah Frincke « Improving the quality of alerts and predicting intruder's next goal with Hidden Colored Petri-Net» Science direct: Department of Computer Science, University of Idaho, Moscow, 2007

**[Dra, Bri et Fil 00]** George Draghici, Nicolae Brinzei et Ioana Filipas, « La modélisation et la simulation en vue de la conduite des systèmes de production»université polytechnique de dintimisoara, 2000

**[Dot et Pia 06]** Mariagrazia Dotoli, Maria Pia Fanti « An urban traffic network model via coloured timed Petri nets » Science direct, Control Engineering Practice, Polytechnique de Bari, Italy, 2006

**[Elm et Mar 99]** Abderraman El Mhamdi, Stéphane Marier, «Modélisation et évaluation de performances des processus semi-structurés de l'entreprise» APII-JESA. Vol. 33-n<sup>0</sup>10, pp 1153-1183, 1999

**[Ers et Esq 86]** J.Erschler, P.Esquirol « Decision aid in job-shop scheduling: a knowledge based approach » IEEE int. conf. on robotics and automation, sanfrancisco,pp1651-1656,USA 1986

**[Esq et Lop 99]** P.Esquirol et P. Lopez « L'ordonnancement », Eds Gestion, Paris, 1999

**[Ess et Al 03]** I.Essafi, F.Alizon, D.Feillet, Y.Dallery, « Optimisation des coûts de manutention dans un atelier de montage », MOSIM'03, 23 à 25 avril 2003

**[Flo et Al 80]** G. Florin et C.Fraize et S.Natkin « Les RdP temporisés et stochastiques. Définition formelle, méthodes de traitement», GRENOBLE. France.1980

**[Flo 85]** G. Florin « RdP stochastiques .théorie et techniques de calcul» Thèse de doctorat d'état, Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, Juin 1985

**[Gia 88]** Giard .V, « Gestion de la production », 2<sup>nd</sup> éd., Collection gestion, Paris, France, 1988

**[Ham 05]** S. Hamaci, « Etude des graphes d'évènements temporisés avec multiplicateurs dans l'algèbre (min,+) » Thèse de doctorat, Université D'ANGERS. ISTIA, Décembre 2005

**[Her 01]** Ulrich Herzog, «Formal methods for performance evaluation», Heidelberg, pp 1-37, 2001

**[Jul 97]** Stéphane Julia, « Conception et pilotage de cellules flexibles à fonctionnement répétitif modélisées par réseaux de Petri »Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, Paris, 1997

**[Jul et Al 95]** S. Julia, R. Valette, M. Tazza, « Computing a feasible schedule under a set of cyclic constraints ».2<sup>nd</sup> International Conference on Industrial Automation, Nancy (France), pp141-146, 7-9 juin 1995

**[Kar 01]** R. Kara « Modélisation, analyse et commande des systèmes flexibles de production par réseaux de Petri » Mémoire de magister, Université de Tizi-Ouzou, 2001

**[Kha 97]** Wael Khansa, « Réseaux de Petri P- Temporels contribution à l'étude des systèmes à évènements discrets» Thèse de doctorat, 190 p, SAVOIE, 1997

**[Kou et Pez 03]** Khalid Kouiss et Nicolas Pezet, « Pilotage d'un système de production à l'aide d'une simulation en ligne » CPI ,2003

**[Kus 90]** A.Kusiak, « Intelligent manufacturing systems » Prentice hall international series in industrial and systems engineering, 1990

**[Laf 91]** Saïd Laftit « Graphes d'évènements déterministes et stochastiques : Application aux systèmes de production» Thèse de doctorat, Paris IX DAUPHINE, 171p, 1991

**[Lem 01]** Tayeb Lemlouma, « Une étude d'approches heuristique pour l'ordonnancement des jobs dans le Flow-Shop », RIST Vol. 11 n<sup>o</sup> 2, 2001.

**[Mer 87]** Mercé C., «Cohérence des décisions en planification hiérarchisée » Thèse de doctorat d'état- sciences, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1987

**[Man et Al 03]** F. Mangione, N.Brauner, B.Penz, « Flow-shop robotisé à quatre machines sans attente » MOSIM'03, 23 à 25 avril 2003.

- [Mer et Far 76]** P.M. Merlin et D.J. Farber. « Recoverability of communication protocols », Implications of a Theoretical Study. IEEE Transactions on Communications, pp 1036-1043, September 1976
- [Mur 89]** T. Murata, « Petri Nets : Properties, Analysis and applications », IEEE, Vol 77, n<sup>o</sup> 4, pp 541-579, April 1989
- [Noe et Nut 73]** J.D. Noe et G.J. Nutt. « Macro e-nets representation of parallel systems » IEEE Transactions on Computers, pp 718-727, August 1973
- [Noy 87]** Noyes D, « Approches méthodologiques pour l'aide à la conception et à la conduite des systèmes de production », Thèse de doctorat d'état, informatique/ productive, Institut national polytechnique de Toulouse, France, 1987
- [Pro et Xie 95]** J.M.Proth et X.Xie , « Les réseaux de Petri pour la conception et la gestion des systèmes de production » Manuels informatiques Masson, Paris, 1995
- [Rus et Sas 05]** Mark F. Russo et Alan Sasso; « Modelling, Analysis, Simulation and Control of laboratory automation systems using Petri nets: Part 1. Modelling » Rutgers University, Piscataway, NJ, 2005
- [Ram 74]** C. Ramchandani. « Analysis of asynchronous concurrent systems by timed Petri nets » Cambridge, Mass : MIT, Dept. Electrical Engineering, PhD Thesis, 1974
- [Sag et Ben 07]** S, Saggadi. Dj, Benazzouz, « Modélisation de la maintenance et analyse des temps d'attente dans les systèmes flexibles de production par les RdP » JOSIM'07, Oran, 12 Mars 2007
- [Sag et Ben 07]** S, Saggadi. Dj, Benazzouz, « Modélisation intégrée des politiques de maintenance et de production basée sur les réseaux de Petri » STMM'07, emp, bordj el bahri, Alger, 07-08 mai 2007
- [Sah 87]** A.K .Sahraoui, « Contribution à la commande et à la surveillance d'ateliers flexibles », Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, Octobre, 1987

**[Sal 99]** N.SALMI, « Analyse des réseaux de Petri stochastiques non bornes pour l'évaluation des performances des systèmes complexes » Thèse de magister, université de Tizi Ouzou, 1999

**[Sau 98]** Jürgen Sauer, « Adaptive Job-Shop scheduling with routing and sequencing flexibility using expert knowledge and coloured Petri Nets » Oldenburg, p 6,1998

**[Sif 77]** J.Sifakis. « Use of Petri nets for performance evaluation » conf: Modelling and Performance Evaluation of Computer Systems, Measuring, pp 75-93, Amsterdam: North Holland, 1977

**[Sil et Val 89]** M.Silva, R.Valette, « Petri Nets and flexible manufacturing » Advances in Petri nets, lecture notes of computer science, Springer Verlag, pp 374-417, 1989

**[Sim 97]** Simo Collart Dutilleul « Commande robuste d'atelier à contrainte de temps de séjour, application à la galvanoplastie », Thèse de doctorat de l'université de Savoie, pp 24-28, France, 1997

**[Tch 94]** Tchako J.F.N, « Contribution à la conception d'un système de pilotage distribué pour les systèmes automatisés de production », Thèse de doctorat, université de Valenciennes, France, 1994

**[Zer et All 92]** Zerhouni, N. Alla, H. « Sur l'analyse des lignes de fabrication par réseaux de Petri continus ». In APII, p 253–276, 1992