

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ M'HAMMED BOUGARA DE BOUMERDÈS

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

DÉPARTEMENT MAINTENANCE INDUSTRIELLE



MÉMOIRE DE MAGISTER

SPÉCIALITÉ : GENIE MECANIQUE

OPTION : MAINTENANCE DES SYSTÈMES MÉCANIQUES

SOUTENU PAR : M^r TEKKOUK NAZIH

-THÈME-

*Analyse et simulation d'une cellule flexible de production
par les Réseaux de Petri(RdP) : formalisme et analyse
technique*

Soutenu publiquement le : **Le 17 juin 2007**

devant le jury composé de :

MM :

Dr. ADJERID S	Maitre de Conférences	UMBB	Président
Pr. BENAZZOZ D.	Professeur	UMBB	Rapporteur
Pr. BENFDILA A.	Professeur	UMMTO	Examineur
Dr. KHELFI K.	Chargé de cours	UMBB	Examineur
Dr. MOHAMMEDI K.	Maitre de conférences	UMBB	Examineur

Année 2006/2007

Résumé

L'objectif de notre travail consiste à modéliser les systèmes de production par les réseaux de Petri (RdP), afin de pouvoir optimiser le taux de production d'un atelier flexible et évaluer ses performances. Ainsi pour développer une planification entre production et maintenance préventive d'un Job-Shop (atelier flexible). Cette planification ne doit en aucun cas perturber le temps d'exécution des tâches de la production ni l'application de la maintenance préventive en tenant compte des délais et de moyens d'interventions. Les résultats de la simulation nous ont permis d'avoir une planification optimale la plus adéquate de l'atelier considéré dans l'étude de cas.

Mots clés: Réseaux de Petri –atelier flexible - job-shop - maintenance préventive -simulation

Abstract

The objective of this research work is to develop a model of a production system model using Petri net to optimise the production rate, carry out a workshop and to develop a good scheduling between production and preventive maintenance of a job-shop Flexible Manufacturing System (FMS). This planning shouldn't disturb the execution time of the production tasks neither the intervention mean time when taking into account the preventive maintenance. The simulation results allowed us to optimise the best scheduling in the considered study case of the work-shop.

Key words: Petri nets - flexible workshop - job-shop -preventive maintenance – Simulation.

ملخص

محتوى العمل الذي قمت به يتلخص في استعمال شبكة بتري في تمثيل مصنع متطور من نوع «جوب شوب» على العلم بان هذه الشبكة ذو استعمال واسع في تمثيل مركبات الإنتاج نظرا لخصائصها السهلة و الفعالة في التمثيل.

وهذا التمثيل له دور فعال في تحسين مردود الإنتاج بتحسين فاعلية الآلات و الحفاظ على حسن استغلالها في أفضل الحالات. وله دور في مراقبة سير المصنع من اجل تنظيم عمل مختلف العمليات المتعلقة بالإنتاج و الصيانة التحضيرية وهذه المراقبة ساهمت إلى حد كبير في حسن تسيير المصنع و تنظيمه، بحيث من خلال هذا التنظيم يمكننا اتخاذ القرارات المناسبة المتعلقة بتنظيم الإنتاج و الصيانة في الوقت المحدد و معرفة الوسائل المتوفرة و المناسبة التي من اجلها تتم عملية الصيانة.

الكلمات الرئيسية: شبكة بتري- جوب شوب- التمثيل- مركبات الإنتاج - الصيانة التحضيرية.

Introduction Général

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

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

Le premier travail dans le domaine de la gestion des systèmes de production, les réseaux de Petri temporisés est présenté par [Merli, 76] et par [Nutt, 73].

Par la suite, beaucoup d'efforts sont portés sur l'application des RdPs dans la modélisation et dans l'évaluation des systèmes de production. On peut citer le travail de [laft, 91] qui a développé un graphe d'événement déterministe et stochastique appliqué à un système de production. [Feng, 93] a réalisé un ordonnancement basé sur les réseaux de Petri. [Cres, 94] a fait une modélisation, simulation et contrôle d'un système de production par les RdP temporisés, [Mari, 94] a développé une Modélisation et évaluation d'une mission de téléopération par les réseaux de Petri Stochastiques Généralisés, [Zhen, 98] a fait une approche d'analyse de performance des réseaux de Petri stochastiques. [Mari, 99] a fait une modélisation et évaluation des performances des processus semi structurés de l'entreprise, [Brin, 99] a développés une modélisation des systèmes de production par une approche Muti-Agents. [Amod, 01] a développés une modélisation et une simplification d'un atelier de production d'ailettes par les RdP, et [Herz, 01] a développé une méthode formelle pour l'évaluation des performances, sans oublié [Leml, 01] qui a fait une étude d'approche heuristique pour l'ordonnancement des jobs dans le Flow-Shop. Pour les réseaux de Petri hybrides, on cite le travail du professeur Abdellah EL MOUDNI de l'école nationale d'ingénieur de Belfort (France) et son équipe qui ont développés le logiciel

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

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

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

Parmi les composants du système industriel, la maintenance semble la meilleure solution permettant d'accroître les performances et d'améliorer le niveau de sûreté de fonctionnement, elle permet d'assurer la pérennité des machines et de veiller à ce que le système ne tombe pas en panne. A la base de ces différentes caractéristiques et propriétés efficaces nous voulons faire une approche qui permet de modéliser à la fois la production et la maintenance préventive. Notre souci est d'avoir une meilleure production possible en minimisant le taux de panne de l'atelier flexible et en même temps de bien gérer les tâches de la production et les tâches de la maintenance préventive de l'atelier considéré.

Après avoir présenté quelque domaine d'utilisation des RdP et l'objectif de notre travail, nous allons d'abord présenté L'historique, les propriétés topologiques et les extensions des RdP dans le chapitre I. Les systèmes de production (SdP) et particulièrement les ateliers flexibles sont présentés dans le chapitre II . Dans le chapitre III on présente les notions fondamentales de la maintenance et le principe de leur modélisation. On présente l'étude de cas dans le chapitre IV qui présente la modélisation de la gestion des SdP en tenant compte de la production, la maintenance préventive. Enfin, on termine par une simulation et une présentation des résultats à l'aide du logiciel « **Sirphyco** » puis on conclura avec des commentaires et des perspectives.

1. Historique

Depuis longtemps déjà, l'homme a ressenti le besoin de comprendre le fonctionnement du monde qui l'entoure. C'est ainsi que très rapidement, il lui a fallu modéliser les phénomènes physiques afin d'en isoler les principaux ressorts. La modélisation lui a permis d'analyser des rapports de cause à effet, d'établir des lois de comportement aboutissant à une prédiction possible de ces phénomènes.

C'est dans cette esprit que Carl Adam Petri a défini dans les années 60, un modèle consacré à l'étude du système à événements discrets : les réseaux de Petri (RdP).

Ce modèle, initialement utilisé pour décrire le fonctionnement des systèmes informatiques, possède des propriétés structurelles que l'on peut facilement mettre en évidence et qui sont immédiatement transportables sur les systèmes réels [Bram,83],[Mura, 89].

Très rapidement ce modèle a été doté d'extensions et a vu son domaine d'application s'étendre en particulier, l'évaluation des performances de système de production fait aujourd'hui largement appel aux RdP.

2. Définitions et concepts de base

2.1- Définitions de base

Un Réseau de Petri est un graphe biparti constitué de places, de transitions (correspondant aux sommets du graphe) et d'arcs orientés qui relient les transitions aux places et les places aux transitions [Khan, 97].

Il est représenté par un quadruple $R = \langle P, T, Pré, Post \rangle$ où :

- $P = (p_1, p_2, \dots, p_m)$: est l'ensemble fini de places,
- $T = (t_1, t_2, \dots, t_n)$: est l'ensemble fini de transitions,
- $Pré$: application de $P \times T \rightarrow N$ (ensemble des entiers naturels) correspondant aux arcs directs reliant les places aux transitions,
- $Post$: application de $T \times P \rightarrow N$ (ensemble des entiers naturels) correspondant aux arcs directs reliant les transitions aux places.

Remarque : Lorsque $Pré$ et $Post$ prennent leurs valeurs dans la paire $\{0, 1\}$, le réseau est dit ordinaire.

$F \subset (P \times T) \cup (T \times P)$: est l'ensemble des arcs,

$m_0 = (m_{01}, m_{02}, \dots, m_{0p})$: est le marquage initial

2.2- Règles de fonctionnement

Une transition est dite franchissable (validée ou tirable) si :

$$\forall p \in {}^0 t \quad M(p) \geq \text{Pr } \acute{e}(p, t)$$

Le tirage (le franchissement) d'une transition t a pour conséquences :

- (i) de retirer $\text{Pr } \acute{e}(p, t)$ marques de chaque place d'entrée p de la transition t .
- (ii) d'ajouter $\text{Post}(p, t)$ marques dans chaque place de sortie p de la transition t .

Le franchissement d'une transition t provoque alors le passage d'un marquage M à un autre marquage M' tel que : $\forall p \in P \quad M'(p) = M(p) + \text{Post}(p, t) - \text{Pr } \acute{e}(p, t)$

Une séquence de transition $s = (t_1, t_2, \dots, t_s)$ est franchissable pour le marquage M_0 si t_k ($k = 1, \dots, s$) est franchissable pour le marquage M_{k-1} obtenu par le franchissement de $s_{k-1} = (t_1, t_2, \dots, t_{k-1})$. L'ensemble des marquages accessibles en partant du marquage M_0 et en franchissant une séquence de transitions, sera noté M_0^* . Si $M \in M_0^*$, il existe au moins une séquence s franchissable qui permet de passer du marquage M_0 au marquage M [Bend, 03].

3. Propriétés des réseaux de Petri

L'analyse d'une fonction ou d'un système séquentiel passe par l'étude des propriétés du RdP qui les présente. Parmi ces propriétés [Vale, 00] nous citerons celles qui suivent :

3.1 Vivacité

Un réseau de Petri G est dit *vivant* pour un marquage initial M_0 si, quel que soit le marquage atteignable $M \in R(M_0)$, il est possible de trouver une séquence de franchissement s qui permet de franchir n'importe quelle transition de G en partant de M . un blocage correspond à un marquage où aucune transition n'est franchissable. La propriété de vivacité assure donc le non- blocage.

3.2 Réseaux Borné

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

Un Réseau de Petri autonome marqué est borné pour un marquage initial M_0 si toutes les places sont bornées pour M_0 (le réseau de Petri est K -borné si toutes les places sont K -bornées).

Du point de vue des systèmes de production, cette propriété garantie qu'il n'y aura pas d'accumulation en cours dans le système, la figure 1.1 est un exemple de RdP non borné puisque, au cours de son évolution, le nombre de marques de la place P_2 croît indéfiniment.

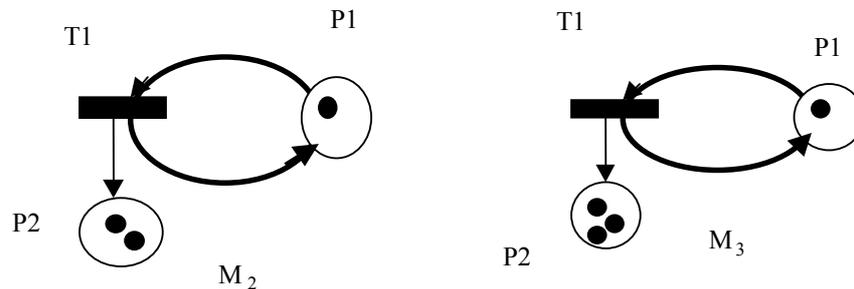
Exemple :

Figure 1.1 Réseau de Petri non borné

3.3 Consistance et réversibilité

Un RdP est dit *consistant* s'il existe un marquage initial M_0 et une séquence de franchissements s contenant au moins une fois chaque transition, tel que $M_0(s > M_0)$.

Un RdP est *réversible* pour un marquage initial M_0 si, quel que soit le marquage atteignable $M \in R(M_0)$, il existe une séquence de franchissements s tel que $M(s > M_0)$. En d'autres termes, dans un RdP réversible, il est toujours possible de revenir au marquage initial.

La plupart des processus industriels ont un fonctionnement répétitif. Il est donc important de vérifier si les RdP qui les représentent sont réinitialisables.

3.4. Persistance

Un RdP est *persistant* pour un marquage initial M_0 si, quel que soit le marquage atteignable $M \in R(M_0)$, et quel que soit le couple de transitions franchissables pour ce marquage, le franchissement d'une des deux transitions n'empêche pas le franchissement de l'autre. Un RdP persistant ne nécessite pas qu'il soit pris des décisions pour la résolution des conflits, car l'ordre de franchissement ne conduira pas à annuler une possibilité de franchissement. Pour cette raison, un RdP persistant est aussi appelé un RdP *sans décision*.

Un RdP sans conflit est toujours persistant

3.5 Conflit structurelle et effectif

Deux transitions sont en conflit structurel lorsqu'elles possèdent une place d'entrée commune. Il existe un *conflit effectif* (figure 1.2) entre deux transitions en conflit structurel s'il existe un marquage qui sensibilise les deux transitions, et tel que le franchissement d'une transition empêche le franchissement de l'autre, une seule transition sera franchie, mais rien dans le réseau ne permet de prévoir laquelle.

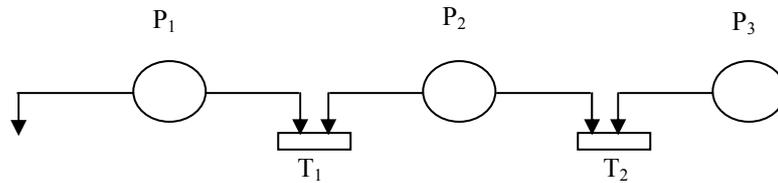
Exemple :

Figure1. 2. Réseau de Petri avec conflit structurel à la place P_2 il y'a un conflit structurel entre T_1 et T_2

3.6. Mutuelle exclusion

Deux places sont en mutuelle exclusion si pour un marquage initial M_0 donné, elles ne peuvent être simultanément marquées quel que soit le marquage M atteint à partir de M_0 .

On rencontre la mutuelle exclusion dans tout système comprenant un partage de ressource.

3.7. Parallélisme

Le parallélisme (ou concurrence) est facilement modélisé par les RdP. Dans l'exemple de la figure 2.3, les transitions T_2 , T_3 sont concurrentes puisqu'il n'y a pas d'indépendance entre les franchissements des deux transitions. Plus précisément l'une des transitions peut être franchie avant, après ou en parallèle avec l'autre.

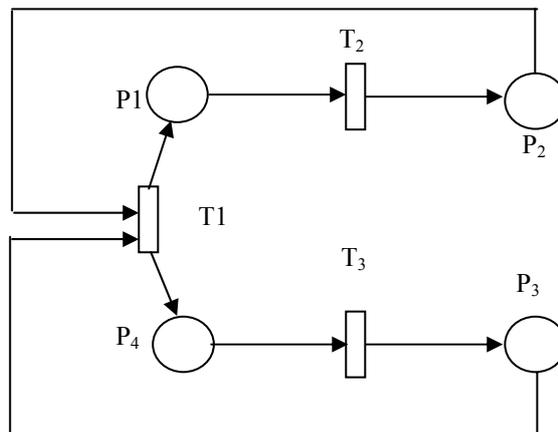


Figure 1. 3. Opérations parallèles

3.8 Modélisation de la concurrence**A/ Concurrence à la fourniture des jetons dans une place**

C'est la convergence d'arcs sur une place (**figure 1. 4.a**) [Cohe, 95]

B/ Concurrence à la consommation des jetons d'une place

C'est la divergence d'arcs à partir d'une place **figure 1.4.b** : ce « conflit structurel » doit être arbitré (lorsqu'il se produit effectivement toutes les deux doivent être activées) par une règle de priorité quelconque; si non le comportement du système n'est pas entièrement spécifié [Cohe, 95].

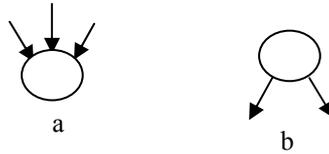


Figure 1. 4. Concurrence des jetons d'une place

3.9. Confusion

Les situations dans lesquelles la concurrence et le conflit sont présents sont appelées des situations de confusion.

Supposons que dans le réseau de la **figure 1.5** les jetons des places P_1 et P_4 arrivent simultanément dans ces places. Dans ce cas les transitions T_1 et T_3 sont en conflit et il faut faire le choix de la transition qui doit être tirée [Laft, 91].

Supposons maintenant que le jeton de la place P_4 arrive dans cette place à une date postérieure à la date d'arriver du jeton dans P_1 . A cet instant, les transitions T_1 et T_3 ne sont

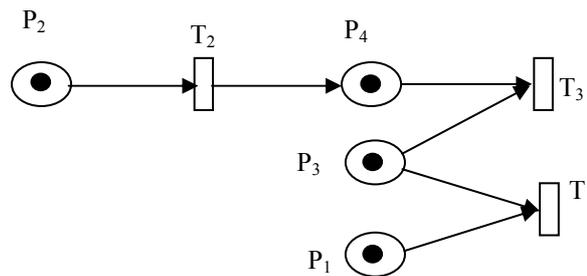


Figure 1.5. : Confusion

Pas en conflit puisque T_1 est franchissable cependant le fait de tirer T_1 immédiatement ne garantit en rien que la vitesse du fonctionnement soit maximale, En effet, l'évolution ultérieure du réseau peut être radicalement différente suivant que l'on tire T_1 ou T_2 à un instant donné.

3.10 Synchronisation

La figure 1.6 montre comment représenter deux opérations synchronisées.

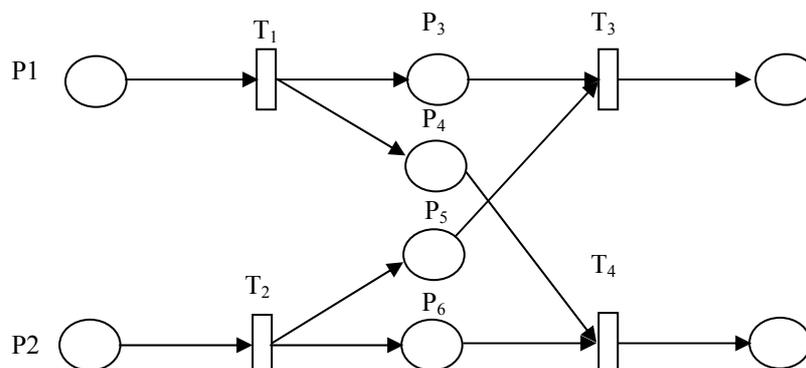


Figure 1.6. Opérations synchronisées.

Les opérations sont représentées par T_1 et T_2 . On voit qu'elles ne peuvent débuter que si elles sont demandées toutes les deux (apparition d'un jeton dans P_1 , P_2). Dans ce cas, les deux opérations débutent dès qu'apparaît la dernière des deux demandes [Laft, 91].

Remarque : Ce modèle peut être étendu à (n) opérations synchronisées.

Modélisation de la synchronisation (et logique)

A/ Synchronisation dans la consommation de jetons de plusieurs places

C'est la convergence de plusieurs arcs sur une transition **figure 1.7a**. [Cohe, 95].

B/ Synchronisation dans la fourniture de jetons à plusieurs places

C'est la divergence d'arcs à partir d'une transition **figure 1.7.b**. [Cohe, 95]



Figure 1.7. Synchronisation

3.10 Graphe d'états

Un RdP non marqué ou marqué est un graphe d'états (figure 1.8) si et seulement si toute transition a exactement une place d'entrée et une place de sortie.

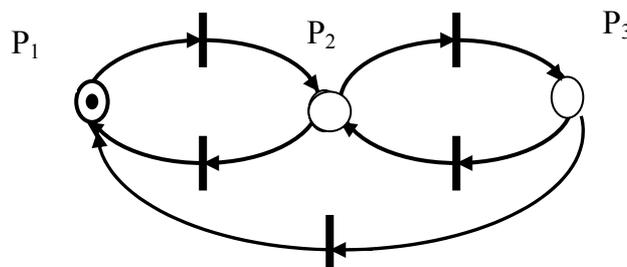


Fig 1.8 Graphe d'état marqué

3.11 Graphe d'événements

Un RdP est un graphe d'événements (figure 1.9) si et seulement si toute place a exactement une transition d'entrée et une transition de sortie. Un graphe d'événement est parfois appelé **graphe de transitions**.

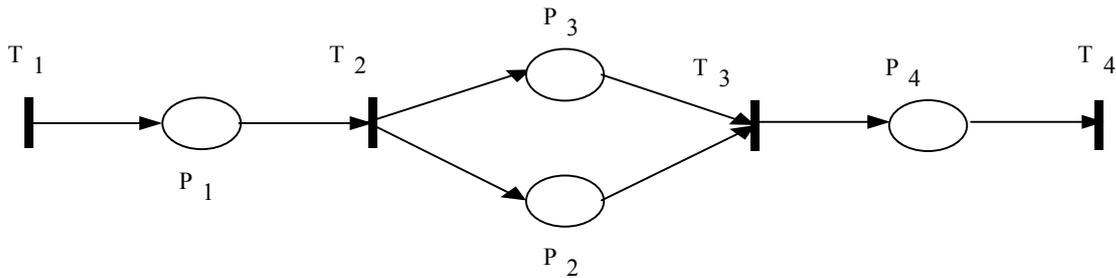


Fig 1.9 : Exemple d'un graphe d'événement

4. Différents modèles des réseaux de Petri

La variété et la complexité des comportements des systèmes mettent en évidence plusieurs types des RdP [Davi & Alla, 89] énumérés ci-après.

4.1. Le graphe d'un Réseau de Petri (RdP)

C'est la représentation d'une structure de réseaux de Petri comme un graphe biparti orienté.

Les nœuds du graphe sont les cercles qui représentent les places et les rectangles qui représentent les transitions.

Les places et les transitions sont connectées par des arcs directs. Il y a un arcs de la places p_r à la transition t_i si et seulement si $(p_r, t_i) \in a$ de même, il y a un arc de la transition t_j à la place p_s si et seulement si $(t_j, p_s) \in b$.

On note encore:

- (1) $t \in T$, $t^- = \{p \in P / (p, t) \in a\}$ t^- est l'ensemble des places d'entrée de t .
- (2) $t \in T$, $t^+ = \{p \in P / (t, p) \in b\}$ t^+ est l'ensemble des places de sortie de t .
- (3) $p \in P$, $p^- = \{t \in T / (t, p) \in b\}$ p^- est l'ensemble des transitions d'entrée de p .
- (4) $p \in P$, $p^+ = \{t \in T / (p, t) \in a\}$ p^+ est l'ensemble des transitions de sortie de p .

4.1.2. Marquages d'un réseau de Petri

Un marquage M d'un RdP $R = (P, T, a, b)$ est une application de P dans \mathbb{N} . \mathbb{N} étant l'ensemble des entiers naturels.

Le marquage M peut être défini aussi bien par un n -vecteur :

$$M = \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_n \end{bmatrix} \text{ est } m_i = M(p_i)$$

Où $n = |P|$ et chaque $m_i \in N$.

Au niveau du graphe, le marquage correspond à une distribution dans les places d'objets appelés **marques**. Une marque est représentée par un point; chaque place p_i aura donc m_i marques.

L'évolution du marquage dans un RdP est contrôlée par le nombre et la distribution des marques.

Le marquage d'un RdP évolue par la mise à feu des transitions. Pour que cette mise à feu soit possible, il faut que la transition soit validée.

Une transition t de R est dite validée par le marquage M si et seulement si $\forall p \in t$ on a $M(p) \geq 1$, c'est-à-dire si et seulement si toute place d'entrée de t contient au moins une marque.

Si \mathcal{M} est l'ensemble des marques de R et t une transition de R , la mise à feu d'une transition t est définie comme étant l'opération qui a un marquage $M_i \in \mathcal{M}$ fait correspondre le marquage M_j tel que :

$$\forall p \in P, M_j(p) = \begin{cases} M_i(p) - 1 & \text{si } p \in t - t' \\ M_i(p) + 1 & \text{si } p \in t' - t \\ M_i(p) & \text{sinon.} \end{cases}$$

La mise à feu d'une transition est définie pour les marquages M qui valident t .

4.1.3 -Application & Matrice d'Incidence avant

L'application d'incidence avant d'un RdP permet de définir une matrice d'incidence avant, W^- , de n lignes et de m colonnes :

- n = nombre de lignes de la matrice = nombre de places du réseau,
- m = nombre de colonnes de la matrice = nombre de transitions du réseau avec

$$W^-_{ij} = \text{Pré}(P_i, T_j)$$

W^-_{ij} : indique le nombre de jetons enlevé de la place P_i par le tir de la transition T_j
 (P_i) est le nombre de jetons dans la place P_i

4.1.4 Application & Matrice d'Incidence arrière

L'application d'incidence arrière d'un RdP permet de définir une matrice d'incidence arrière, W^+ , de n lignes et de m colonnes :

- n = nombre de lignes de la matrice = nombre de places du réseau,
 - m = nombre de colonnes de la matrice = nombre de transitions du réseau avec
- $$W^+_{ij} = \text{Post}(P_i, T_j)$$

W^+_{ij} : indique le nombre de jetons ajouté à la place P_i par le tir de la transition T_j

Matrice d'incidence

La matrice d'incidence W d'un RdP est une matrice de n lignes et de m colonnes telle que :

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} T_1 & T_2 & \dots & T_j & \dots & T_m \end{matrix} \\ \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_i \\ \vdots \\ P_n \end{matrix} & \left[\begin{array}{cccccc} & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ \dots & & & W_{ij} & & \\ & & & & & \\ & & & & & \end{array} \right] \end{matrix}$$

$W_{ij} = W^+_{ij} - W^-_{ij}$ et $W = W^+ - W^-$

W_{ij} : indique la modification du marquage de la place P_i par le tir de la transition T_j . La matrice d'incidence **W définit complètement le RdP et est indépendante du marquage.**

Exemple : La figure 2.10 représente la matrice d'incidence w

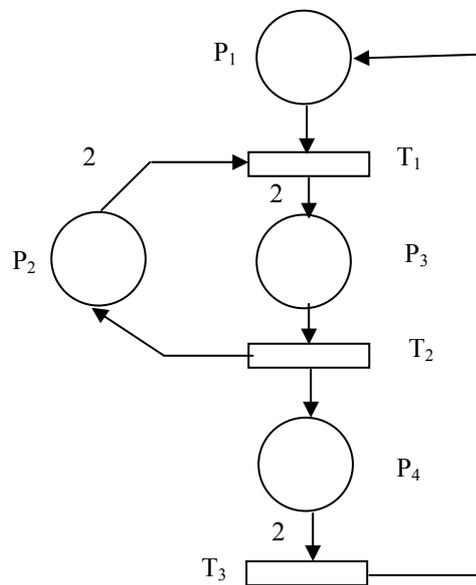


Fig. 1.10 Modèle représentatif de la matrice d'incidence W_{ij}

$$W = W^+ - W^- = \begin{matrix} & \begin{matrix} T_1 & T_2 & T_3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{matrix} & \left[\begin{array}{ccc} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 1 & 0 \\ 2 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -2 \end{array} \right] \end{matrix}$$

$$W^- = \begin{matrix} & \begin{matrix} T_1 & T_2 & T_3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{matrix} & \left[\begin{array}{ccc} 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{array} \right] \end{matrix}$$

$$W^+ = \begin{matrix} & \begin{matrix} T_1 & T_2 & T_3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{matrix} & \left[\begin{array}{ccc} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{array} \right] \end{matrix}$$

Le tir de T_1 :

- enlève un jeton de P_1
- enlève 2 jetons de P_2
- ajoute 2 jetons à P_3
- ne modifie pas le marquage de P_4

4.2. 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. Les réseaux de Petri temporisés sont utiles pour l'évaluation des performances d'un système. Il y a principalement deux façons de modéliser la temporisation : soit les temporisations sont associées aux places on dira que l'on a un RdP **P-temporisé**, soit les temporisations sont associées aux transitions on dira qu'on a un RdP **T-temporisé**.

4.2.1. 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.

Fonctionnement

Lorsqu'une marque est déposée dans la place P_i , cette marque doit rester dans cette place au moins pendant un temps d_i . On dit que la marque est **indisponible** pendant cette durée. Ceci est représenté sur la **figure 1.11.a**.

Lorsque la transition t_1 est franchie une marque est déposée dans la place P_1 et reste indisponible pendant un temps d_1 . quand cette marque devient disponible, la transition t_2 devient validée. Quand elle sera franchie, une marque indisponible sera déposée dans P_2

4.2.2. RdP T-temporisé

Pour chaque transition T_i est associée une temporisation.

Fonctionnement

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 1.11.b**. 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 .

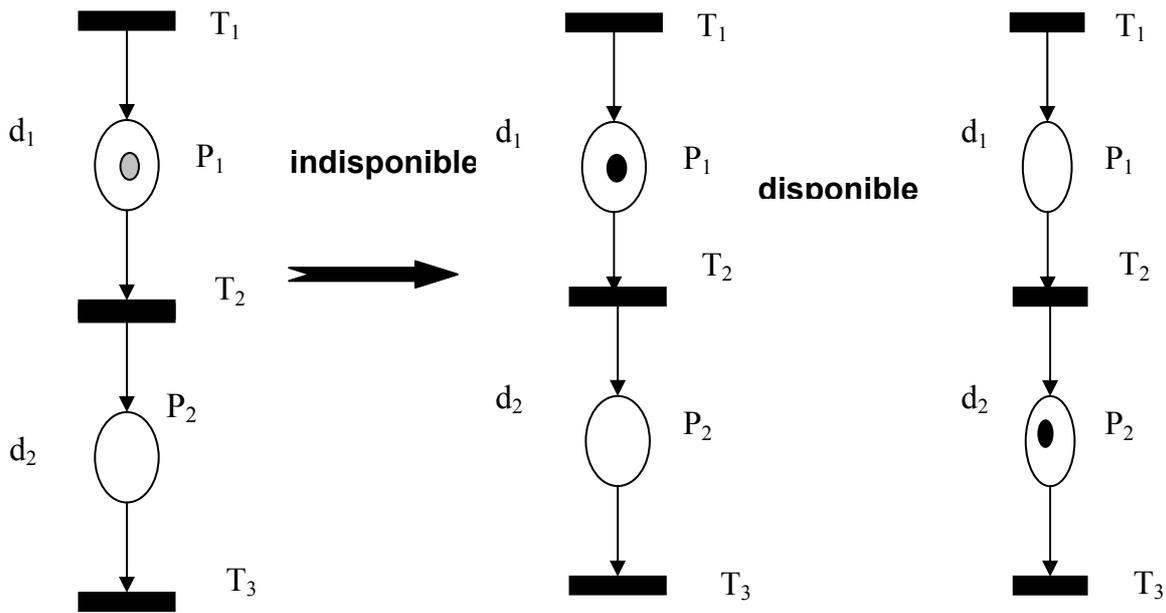


Fig 1.11.a : temps d_1 associe à la place P_1

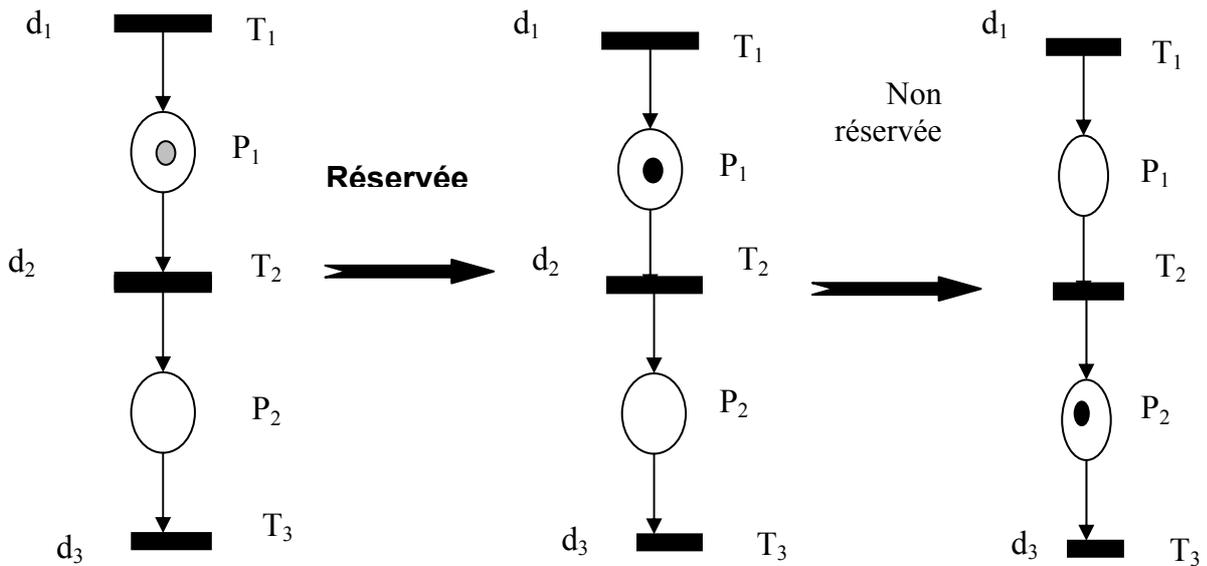


Fig 1.11.b : temps d_2 associe à la transition T_2

4.3. Réseaux de Petri Synchronisés (RdPS)

Un RdPS, noté R_s est défini par :

- (i) Un RdP $R = (P, T, a, b)$
- (ii) Un ensemble E d'événement externe contenant un élément e appelé "événement toujours présent".

(iii) Une application μ de T dans E.

On représente un RdPS par le graphe du RdP associé en portant sur chaque transition t_j le renseignement $\langle \mu(t_j) \rangle$ précisant l'événement associé à t_j .

La procédure de l'opération sur les marquages est détaillée ci-après.

Soit $x \subseteq E$ un sous-ensemble d'événements.

Une transition t de R_s est dite réceptive à x pour un marquage M si et seulement si t est validée par M et $\mu(t) \in x$.

Soit $T_{x,M} = \{t_1, t_2, \dots, t_r\}$ l'ensemble des transitions réceptives à x pour M .

On appelle : "Séquence de simulation complète par rapport à x pour le marquage M' " toute séquence de simulation σ_c à partir de M qui vérifie les propriétés suivantes :

- (i) Les transitions de σ_c sont exclusivement des transitions de $T_{x,M}$.
- (ii) Toute transition de $T_{x,M}$ n'apparaît qu'une fois au plus dans σ_c .
- (iii) Toute séquence σ'_c obtenue en permutant les transitions de σ_c est aussi une séquence de simulation à partir de M .
- (iv) σ_c est maximale, c'est-à-dire qu'il n'existe pas d'autre séquence plus longue qui contienne toutes les transitions de σ_c .

On appelle Tir sur occurrence de x appliqué à M l'exécution à partir de M d'une séquence de simulation complète σ_c .

On note : $M \xrightarrow{x/\sigma_c} M'$

Le marquage M' est dit *marque atteint* par suite du tir sur occurrence de x appliqué à M selon σ_c .

On appelle Tir itéré sur occurrence de x appliqué à un marquage stable M' une séquence de tirs composée d'un tir sur occurrence de $\{e\}$ jusqu'à atteindre un marquage stable M' .

4.4. Réseaux de Petri Temporisés Synchronisés

On définit un environnement pour un RdPTS par un ensemble d'éléments externes E contenant l'événement toujours présent e et tel que, à tout événement $x \in X \neq e$, est associée une fonction croissante τ_x de $N - \{0\} \longrightarrow R^+ - \{0\}$, $\tau_x(i)$ étant l'instant d'occurrence de la $i^{\text{ème}}$ occurrence de x à partir de l'instant initial "0".

L'ensemble des événements survenant à l'instant τ est égal à :

$$\{x \in E - e / \exists i \in N - \{0\} \text{ et } \tau_x(i) = \tau\} \cup \{e\}$$

Un RdPS est défini par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Un RdPs } R_s = (R, E, \nu) \\ \text{Un ensemble } \nu = \{ \nu_p, p \in P \} \text{ d'applications croissantes de } R^+ \rightarrow R^+; \\ \text{ou } P \text{ est l'ensemble des places de } R. \end{array} \right.$$

On représente un RdPTS par le RdPS associé en spécifiant à coté de chaque place p l'application ν_p .

Les opérations sur les marquages s'effectuent de la manière suivante : dans un RdPTS une marque peut être soit disponible, soit indisponible, selon qu'elle est restée dans la place correspondante le temps nécessaire ou non. Alors à chaque instant τ le marquage M' est la somme de deux marquages M_d (disponible) et M_i (indisponible). Une transition est validée par M si et seulement si elle est validée par M_d .

On dira que $\sigma = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ est une séquence de simulation instantanée à partir de M à l'instant τ si on peut mettre à feu les transitions t_1, \dots, t_n à partir de M à l'instant τ .

Les opérations de tir sur occurrence d'événements à un instant τ et de tirs itérés sur occurrence d'événements à l'instant τ s'effectuent de la même manière que dans un RdPS en utilisant pour chaque tir une séquence de simulation complète instantanée à l'instant τ .

On peut définir un RdP Temporisé (RdPT) comme étant un RdPTS tel que l'ensemble E se réduit à l'événement toujours présent e .

On a défini jusque là plusieurs types des réseaux de Petri les plus fréquemment utilisés. Dans ce qui suit on présentera les critères d'évaluation des performances utilisant les RdP.

5. Propriétés et théorèmes pour l'évaluation de performance

Théorème 1 [Rama,80] : Le temps de cycle minimal de fonctionnement d'un Graphe d'événements Fortement Connexe (GEFC) temporisé est donné par C_{\max} , où C_{\max} est le maximum des temps de cycle des circuits élémentaires du réseau.

Théorème 2 [Chre,83] : Le comportement asymptotique d'un GEFC fonctionnant au plus tôt est k -périodique avec une fréquence de franchissement des transitions égale à $1/C_{\max}$. Autrement dit, il existe N_0 et k tel que pour tout $n \geq N_0$, et pour toute transition t , les dates de tirs de t vérifient :

$$Xt(n+k) = Xt(n) + k C_{\max} \longrightarrow \text{Eq .II.1}$$

Propriété 1 [Laft,91] :Le marquage d'une solution optimale en fonctionnement **1-périodique (FPE)** est aussi le marquage d'une solution optimale pour le même problème en fonctionnement au plus tôt (FPT) (dans un GEFC).

Soulignons cependant le fait qu'en terme de temps de cycle, le fonctionnement périodique (ou plutôt 1-périodique) fournit les mêmes performances. Le fonctionnement optimal équivalent est donc obtenu en contrôlant les transitions à une fréquence imposée C_{max} . Pour cette raison le FPE sera souvent appelé fonctionnement 1-périodique contrôlé. On imposera donc à la commande de répondre aux conditions de cyclicité définies par Saïd Laftit [Laft,91] :

Soient $^{\circ}p$ la transition d'entrée de p et p° sa transition de sortie, $S^{\circ}p(n)$ est l'instant du nième franchissement de $^{\circ}p$ et $Sp^{\circ}(n)$ l'instant du n ième tir de p° . En fonctionnement périodique on a :

$$S^{\circ} p (n) + d(p) \leq Sp^{\circ}(n) + C_{Mo}(p) \longrightarrow \text{Eq .II.2}$$

pour tout entier n et pour toute transition t . La deuxième condition est :

$$St (n) = St(1) + (n -1)C \longrightarrow \text{Eq .II.3}$$

Pour toute place p de durée associée $d(p)$ et pour tout entier positif n .

En somme, le FPE et le FPT fournissent les mêmes temps de cycle. Par contre, le FPE nécessite l'ajout d'une couche de commande. Les performances pour le FPT sont connues : le temps de cycle est égal à C_{max} , alors que celui du FPE est réglable : C_{max} n'est que sa borne inférieure.

6. Mise en œuvre des réseaux de Petri

6.1 Domaine d'application

Les réseaux de Petri peuvent être utilisés pour spécifier, valider et implémenter tout système discret comprenant des évolutions simultanées, ils sont recommandés lorsque ces systèmes communiquent avec le monde extérieur.

On peut citer plusieurs domaines d'application, l'implémentation de dynamique dans les systèmes d'informations [Anis, 04], la gestion de la production [Chen, 03], la conception de mécanismes d'allocation de ressources et de procédures de synchronisation des tâches dans les systèmes centralisés ou répartis ou bien pour l'élaboration de cahiers des charges de système de commande de procédés industriels.

6.2 Choix d'un modèle pour une application

Lorsque l'on décide d'utiliser les RdP pour la spécification et la réalisation d'un système réel, on pose tout de suite la question suivante : quel modèle utiliser ? quelle extension des RdP utiliser ?

D'abord il est souvent souhaitable de spécifier un système de grande taille en le décomposant en sous système. Une décomposition n'est vraiment satisfaisante que si on

utilise des règles de construction modulaires telles que les propriétés structurelles et les propriétés dépendant du marquage initial soit conservées.

D'autre part, on peut introduire des étiquettes associées aux transitions du réseau, et faisant intervenir des variables auxiliaires de synchronisation. Cela revient, En fait, à modifier le découpage entre la partie commande et données du système et à utiliser un système de transition comme modèle.

Il faut de toute façon souligner qu'il paraît utopique de vouloir donné une réponse générale et définitive à ce problème de choix. D'une part le choix d'un modèle est beaucoup trop lié à l'application considérée, au besoin et au type de validation que l'on veut faire.

Ce choix peut à tout moment être remis en cause par l'application de méthode d'analyse performante pour certaines extensions ou abréviations des réseaux de Petri.

Conclusion

En tant qu'outil de modélisation, les réseaux de Petri sont particulièrement bien adaptés pour décrire certain aspect de contrôle des systèmes à évolution parallèle, tel que les conflits. Le séquençement ainsi que des mécanismes de base de communication. Leur intérêt dans la représentation des processus discontinus ou discrets n'est plus à démontrer.

Vieux d'un quart de siècle, cet outil graphique a conquis les laboratoires d'automatiques, il lui reste à pénétrer plus profondément le monde industriel.

Du point de vue utilisateur, ce qui caractérise les RdP vis-à-vis d'autres modèles de spécification de système parallèle, c'est qu'ils permettent d'analyser le comportement du système représenté et d'en déterminer de nombreuses propriétés. Les systèmes exploités aujourd'hui ont un grand degré de complexité, exprimée en quantité d'information à traiter, qui ne satisfait plus des RdP généralisés. Pour cela différentes extensions des RdP sont introduites, telle que : les RdP colorés, à objet...etc.

Il reste que les RdP sont d'un accès difficile aux non-spécialistes. Par ailleurs, il n'existe pas de méthodes de construction de modèles réseaux de Petri.

1. Les systèmes de production (SdP)

1.1. Notion de base

Le processus de production [Sass, 98] est généralement composé d'un grand nombre d'opérations ou de transformations de forme (modification des produits eux mêmes), des transformations dans le temps (fonction de stockage) ou dans l'espace (fonction de transport).

Les systèmes de production diffèrent par les objectifs que s'assigne le producteur. Ils diffèrent par les attributs des objets transformés et par les caractéristiques des processus de

production. Ils ne sont pas statiques et ils évoluent sous les effets conjugués de l'évolution du marché, des technologies et des sociétés dont lesquels ils sont insérés. Ils se définissent par les attributs de sortie : coût des produits assemblés, qualité de l'assemblage, quantité des produits par unité de temps, délais, moyen de livraison d'un produit (ou temps de service)...etc.

1.1.a. Nature de la production

La nature de la production permet de distinguer entre les entreprises fournissant des services (*bureaux d'études, entreprises de transport,...*), les entreprises de montage (*les industries de l'électronique et d'assemblage, les chaînes de montage automobile, ...*) et celles fabriquant des produits après transformation de la matière première (*les industries de mécanique, les industries de chimie, ...*).

1.1. b. Mode de production

Il existe essentiellement deux principaux modes de production :

-La production continue, qui concerne tous les produits pour lesquels le processus de transformation de la matière première ne s'interrompt pas entre deux installations technologiques consécutives (*machines, ...*). Ce mode de production est caractérisé par l'inexistence de stockage entre les postes de travail sauf parfois pour la régulation du flux, dans ce cas là, on parle souvent d'industries de process (*terme désignant des entreprises produisant des produits par des opérations de fusion, de séparation ou de transformations chimiques. Ces entreprises appartiennent principalement à la pétrochimie, la chimie lourde, la sidérurgie mais on en trouve également dans le secteur des industries alimentaires* [Giar, 03]).

-La production discontinue, (ou discrète) qui concerne les produits réalisés suivant un processus de fabrication pouvant être fractionné pour permettre de reprendre des produits semi-finis. Dans ce cas, la présence d'espaces de stockage entre ateliers (*machines*) est requise. On parle d'industries manufacturières et on cite à titre d'exemple les entreprises d'assemblage [Hent, 99].

1.1.c. Types de production

Les types de production sont au nombre de trois [Hent, 99]

-La production par lot, où le lot de fabrication peut être composé de quelques unités à plusieurs centaines d'unités ; cela pose le problème de la fréquence des réglages de machines et des changements d'outils. Généralement, on essaye de trouver une taille de lot acceptable ; dans ce cas, on parle souvent de quantité économique de production. Ce type

de production est souvent caractérisé par des temps de réglages machines importantes entre les différents produits.

-La production unitaire, qui concerne les produits singuliers et spécifiques (*construction navale, ponts, bâtiments, ...*). Ce genre de produits est réalisé sur commande et nécessite un devis de production.

-La production de masse, qui concerne les produits standards qui sont fabriqués en très grande quantité et leur écoulement sur le marché est relativement facile par rapport au type de production unitaire qui n'est fabriqué que sur commande.

1.1.d Les objectifs de production

Où tout chef d'entreprise souhaitant développer son système de production est amené à agir dans plusieurs directions aussi bien à moyen terme qu'à long terme. Il recherche à [Hent, 99]:

- Minimiser les risques de l'entreprise,
- Optimiser les stocks,
- Diminuer le poids des en-cours,
- Diminuer le coût de revient des produits,
- Diminuer les délais, ... etc.

Certains objectifs vont dans le même sens, sans avoir toutefois pour optimiser la même solution. D'autres, par contre, sont antagonistes.

Donc, tout SdP utilise des personnes, du matériel et de l'information pour exécuter les activités d'entrées de traitement, de sorties, de stockage et de contrôle lesquelles transforment les matières premières en produits finis.

1.2 Cycle de vie d'un système de production

L'organigramme de **la figure 2.1** représente les différentes phases du cycle de vie d'un système de production [Savi 94]. Il est important de souligner ici que cette classification n'est pas unique et que d'autres variants de cet organigramme peuvent être trouvés dans la littérature. Nous identifions essentiellement quatre parties principales dans ce cycle de vie.

- La spécification des produits
- La conception préliminaire.
- La conception détaillée.
- La production

a) Phase de spécification des produits

Le processus de conception débute par une étude du marché qui a pour objectif de déterminer les besoins. Ces besoins doivent ensuite être exprimés sous une forme plus adaptée à la réalisation du système de production permettant la fabrication de ces produits.

b) Phase de conception préliminaire

Différentes étapes composent la phase de conception préliminaire (encore appelée étude papier). La première étape consiste à choisir les ressources (type et qualité) parmi celles qui sont disponibles sur catalogue, afin de réaliser la production prévue pour le système. La deuxième étape est l'évaluation économique ; les coûts croissants d'implantation de tels systèmes et les risques que cela comporte imposent plus que jamais une bonne évaluation économique du projet. L'objectif est d'évaluer les investissements nécessaires à l'implantation du système. L'étape d'agencement a pour but de trouver la meilleure disposition des ressources sur la surface disponible. L'étape de choix du système de gestion permet de définir l'architecture de contrôle/commande qui sera utilisée pour gérer le système. La dernière étape concerne l'évaluation du comportement dynamique du système qui permet de valider la conception et de vérifier le respect du cahier de charge établi pour le système.

c) Phase de conception détaillée

La première étape de cette phase correspond à l'implantation physique du système. Cette étape est suivie par la réalisation de tests qui permettront de détecter des erreurs possibles de fonctionnement. Après une étape de formation du personnel pour l'opération du nouveau système, une mise en marche du système en mode ralenti est effectuée. Ceci a pour but de permettre de réaliser les derniers réglages du système avant la mise en marche définitive.

d). Phase de production

Cette phase correspond à l'exploitation du système. On trouve ici des opérations qui concernent directement le fonctionnement du système, telle que la conduite en temps réel et la supervision du système.

1.3 Critères d'évaluation d'un système de production

Les systèmes de production, devenant de plus en plus complexes, suite à une grande flexibilité [Sass 98], sont un fort degré d'automatisation, leur conception et leur exploitation nécessitent des techniques d'évaluation se basant sur deux aspects principaux

- **La performance** : la performance d'un système peut être définie comme étant l'efficacité à fournir un service attendu à un instant donné et à des conditions

prédéterminées. Elle est liée à tout le cycle de vie d'un système de production, à sa productivité, aux stocks en cours, aux coûts de production, au délais de livraison, à la qualité de produit, ... etc.

- **La sûreté de fonctionnement** : elle permet d'établir le degrés de fonctionnement que l'on peut attribuer à un système dans le cadre de la mission qu'il doit assurer appelée également science des défaillances des machines. Elle consiste à connaître, évaluer, prévoir, mesurer et maîtriser les défaillances des machines. Elle se caractérise par l'étude structurelle (statique et dynamique) des systèmes du point de vue prévisionnel mais aussi opérationnel et expérimental en tenant compte des aspects probabilités et conséquences des défaillances.

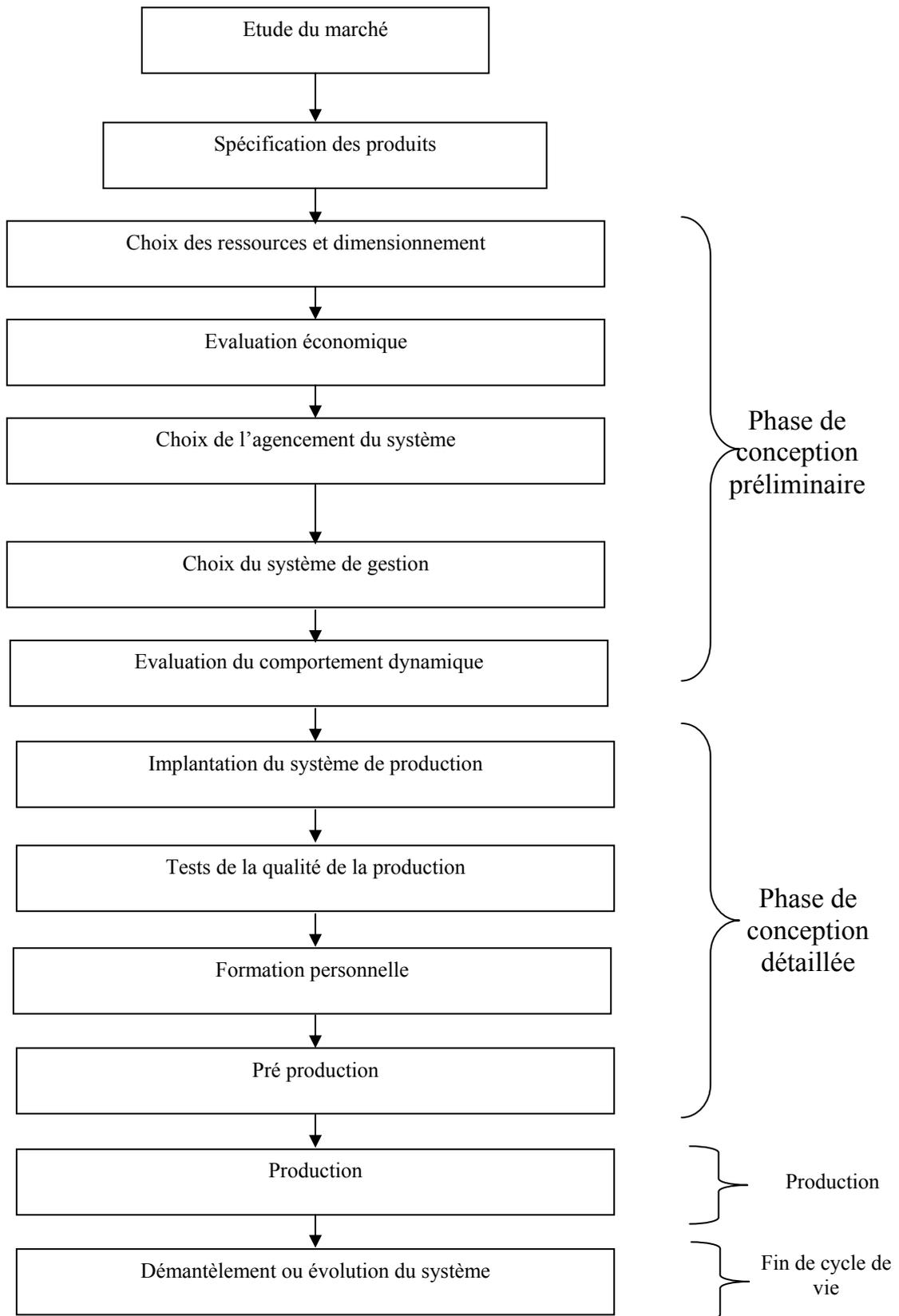


Figure2.1 Cycle de vie d'un système de production

2. Les Systèmes Flexibles de Production (SFdP)

Un SFdP représente plusieurs cellules flexibles reliées entre elles par des véhicules filoguidés composant les diverses zones de production.

Le système flexible¹ est un système capable de s'adapter à toute nouvelle contrainte imposée par l'environnement dont lequel la production est gérée (changement de produit, modification de flux de production).

Une définition relativement précise de ces derniers est proposée par [Widm, 91] ; «Un atelier flexible permet la production de pièces de types divers et en qualités variables. Les opérateurs n'interviennent pas directement dans le processus de fabrication et limitent essentiellement leurs interventions à l'entretien ; l'ordonnancement de la production est géré par un système informatique».

Cette définition nous incite à rappeler d'autres notions rattachées aux systèmes flexibles de production. Ces notions sont évoquées comme suit :

- Module flexible

C'est une machine avec une aire de stockage avec un chargeur de pièce.

- Cellule flexible

Elle représente plusieurs modules reliés par un véhicule filoguidé permettant l'alimentation des machines en pièces.

-Groupe flexible

C'est un ensemble de cellules et de modules formant la zone de production (fabrication, usinage ou assemblage) joint par des véhicules filoguidés, le tout est géré par un ordinateur central ;

-Ligne flexible

C'est un ensemble d'instruments attribués aux divers machines comme une ligne de véhicules filoguidés, de robots, de convoyeurs, de navettes ;...

-Atelier flexible

C'est un ensemble de machines reliées par un système de manutention automatique, le tout contrôlé par un système central informatisé.

-Centre de production

C'est un terme utilisé pour désigner un ensemble de ressources (hommes et/ ou machines) mises en œuvre dans un processus productif (fabrication assemblage, manutention) ; selon le niveau de détail requis pour l'étude d'un problème donné, le niveau d'agrégation est plus ou moins élevé (machine ou atelier ou usine).

¹ Le mot flexible signifie une souplesse ou adaptation du système de production face à un changement. Un système flexible est différent d'un système automatisé.

-Centre d'usinage

C'est un ensemble de machines – outils à commande numérique, complétées par un dispositif permettant le changement d'outils automatique et par un dispositif d'alimentation permettant le montage et démontage d'une pièce pendant que la machine usine une autre pièce (le montage et démontage sont donc effectués en temps masqué, ce qui provoque un gain considérable).

3. Typologie des systèmes de production

Le premier souci d'un chef de production, dans les années cinquante, était de réaliser des gains de productivité. Pour cela, le premier réflexe a été de constituer des lignes de fabrication dans lesquelles les opérations de montage et de démontage, d'usinage et de manutention s'enchaînent de façon automatique.

Une ligne de fabrication ou de transfert est composée d'une succession de machines séparées éventuellement par des stocks. Dans ce type de système, une pièce brute provenant de l'extérieur passe successivement sur toutes les machines constituant la ligne dans un ordre immuable. La recherche du gain de productivité sans perte de flexibilité a permis le développement des machines outils à Commande numérique. Un centre d'usinage est ainsi une machine-outil qui rassemble les fonctions des fraiseuses, des perceuses et des aléseuses.

Dans les dernières décennies, les conditions de la production industrielle ont été bouleversées par des profondes mutations d'ordre économique, technologique, social...etc. Le dilemme fondamental entre productivité d'une part, flexibilité et innovation d'autre part, est remis en cause par les technologies flexibles qui permettent l'automatisation de la diversité et de la complexité.

Les technologies flexibles ont des effets triples. Elle affectent les facteurs de performances (augmente la productivité, réduit la durée des cycles, réduisent les niveaux des stocks et d'en-cours,...etc.), les modes d'organisation du travail et les compétences attendues du personnel. Dans la littérature, divers types d'ateliers flexibles ont été introduit ; on peut citer quelque'un d'entre eux :

- ❖ **Atelier à flot (flow-shop)** : dans ce type d'atelier (**figure 2.2**), on dispose de n pièces qui doivent s'exécuter suivant le même ordre sur les m machines qui composent l'atelier ; ces pièces ont donc toutes le même ordre de passage sur les machines mais pas le même ordre d'exécution. Si tous les temps d'exécution sont positifs, l'atelier est de type Flow-shop pur

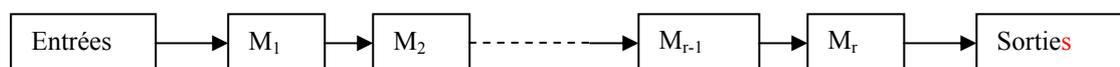


Figure 2.2.Flow-shop pur

Si non s'il existe des temps d'exécution nuls (une pièce ne devrait pas subir une opération sur une machine particulière), on parle d'un flow shop généralisé (**figure2.3**).

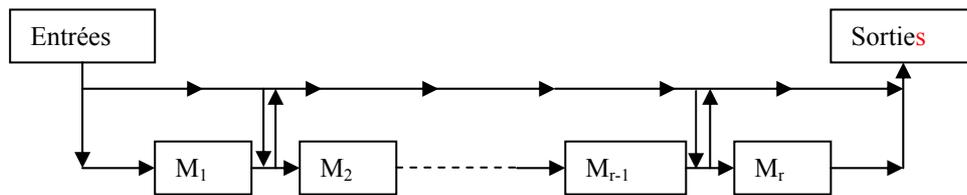


Figure2.3 .Flow-shop généralisé

Atelier à tâche (job-shop) : les machines ne sont pas ordonnées et un nombre important de routages est possible, le routage d'une pièce peut démarrer et se terminer sur n'importe quelle machine de l'atelier, soit l'exemple d'un système de production (**figure 2.4**) à trois machines et trois produits.

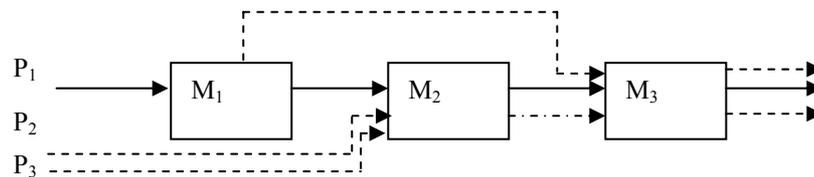


Figure 2.4. Exemple d'un atelier de type job-shop

❖ **Atelier d'assemblage (assembly-workshop)** : une machine M_k peut effectuer un assemblage de deux pièces différentes, l'une provenant d'une machine M_i et l'autre d'une machine M_j . D'une manière générale, la symétrie entre les produits assemblés doit être respectée. De la même façon, qu'un atelier de désassemblage qui a été également

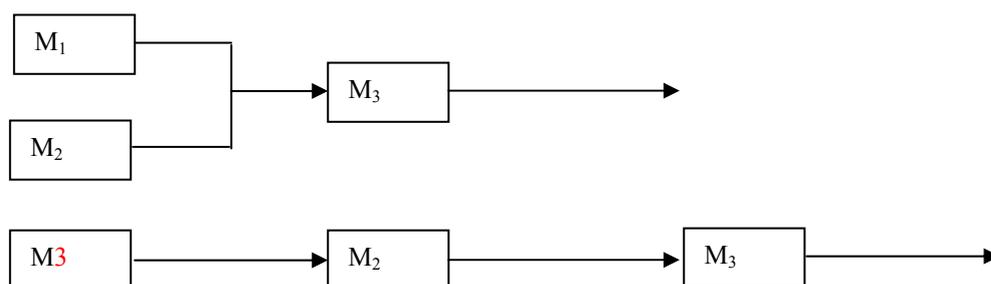


Figure 2.5. Exemple d'un atelier de type d'assemblage

Introduit, soit un exemple de système de production (**figure 2.5**) de trois machines et deux produits.

4. Pilotage des systèmes de production

Pour mener à bien la fonction de pilotage dans un système de production classique, le gestionnaire doit s'assurer entre autres de la bonne exécution des cinq sous fonctions présentées ci-après [Hent, 99], [Arti, 97].

-La planification

Elle détermine le plan directeur de production qu'est le compromis entre les objectifs commerciaux, financiers et la production de l'entreprise. L'horizon de planification est souvent le moyen ou le long terme. Cette fonction est caractérisée surtout par un horizon temporel étendu et par un degré de finesse des informations traitées très générique.

-La programmation

Elle établit un programme prévisionnel de production basé sur le plan directeur de production et sur l'état des stocks. L'horizon de la programmation est souvent le très court terme (*la semaine*).

-L'ordonnancement

Il détermine d'abord les priorités de passage des travaux sur les ateliers (*séquencement*) et les différentes affectations temporelles des machines. En fait, cette sous-fonction est constituée d'une partie séquencement et d'une autre affectation. L'horizon peut être le court ou le moyen terme.

L'ordonnancement a pour objet de définir, prévoir et coordonner l'ensemble des ressources physiques et humains nécessaires à la fabrication. La meilleure solution devra permettre d'optimiser l'utilisation des ressources tout en respectant les délais de réalisation fixés. Cette solution doit donc répondre aux questions suivantes : Qui? Quoi? Quand? Combien? [Jave, 97]. La réponse sera obtenue lorsqu'on saura qu'elle est la séquence de passage des travaux et les machines sur lesquelles ils doivent passer, tout en optimisant un ou plusieurs critères donnés [Hent, 99].

-La conduite

Elle règle en temps réel les problèmes non résolus par le niveau prévisionnel et elle se charge de la réalisation effective du programme de fabrication prévu.

-La commande

Elle se charge de la traduction de l'ordre de fabrication en une séquence d'instructions exécutables par une ressource.

5. Modélisation des systèmes de production

La modélisation des SdP a pour objective de représenter graphiquement les relations entre les différents composants du système.

La littérature est riche d'outils de modélisation appelés également outils d'investigation et d'aide à la décision. Ces outils sont représentés dans le **tableau II.1** suivant : [Giar03]

Tableau. II.1 : Extrait d'outils d'investigation et d'aide à la décision

	<i>Décision de régulation</i>	<i>Décision de Pilotage</i>	<i>Décision de Planification</i>
<i>Décisions Programmables</i>	- Tables de décision	- outils statistiques, ...	
<i>Décisions Structurées</i>	- Algorithmes d'ordonnement - SADT (Structured Analysis and Design Technique) - Réseaux de Petri, ...	- Méthodes et modèles de la recherche opérationnelle - SADT - Simulation, ...	- Méthodes et modèles de la recherche opérationnelle - Méthodes multicritères - SADT - Simulation, ...
<i>Décisions Structurées ou Hybrides</i> <i>NON ou</i>		- Analyse bayésienne - Simulation, ...	- Méthode DELPHI - Méthodologie d'analyse et de conception (MERISE, SADT, GRAI) - System analysis - Simulation, ...

L'examen des outils présentés par ce tableau montre que :

- la simulation présente un caractère universel,
- la méthode SADT est l'une des méthodes largement utilisées par les spécialistes du domaine. A titre d'illustration, **l'annexe 1** fournit des modélisations simplifiées d'un SdP par l'outil SADT.

Conclusion

Les Systèmes de Production sont des systèmes complexes dont la modélisation et l'analyse de leurs performances nécessitent le recours à des méthodes et outils puissants qui permettent une modélisation fiable. Les RdP sont des outils les plus utilisés dans ce domaine et qui sont présentés dans le chapitre suivant.

Introduction

L'évolution et la complexité des systèmes de production ainsi que le besoin de produire vite et bien, ont obligés les industriels à structurer et à organiser les « ateliers d'entretiens », ils ont surtout crée de nouveaux concepts et de nouvelles manières d'intervenir sur des structures de production concernant les produits manufacturés. Ce changement ne réside pas dans un changement de dénomination, mais un développement dans les techniques et dans l'organisation de ces ateliers ; cet entretien devient « la maintenance ».

Il y a quelques dizaines d'années, l'entretien des machines ou des unités de production se fait par des personnes, spécialistes ou non, sans logistique établit et bien définie. La production intensive, la complexité des systèmes et surtout la rentabilité, ont poussé les industriels à créer un domaine et une structure dans l'entreprise appelée « service de maintenance ».

Notre travail, on s'intéresse à la modélisation des tâches de la maintenance préventive ; dont le but d'obtenir un modèle complet qui englobe la maintenance et la production. L'outil recherché pour la modélisation doit permettre de représenter des mécanismes particuliers tels que : parallélisme, synchronisation et partage des ressources. Pour cela nous avons utilisé les RdP Temporisés Généralisés Synchronisés (RdPTGS)

1. Définition et notion de base

1.1 La fonction maintenance

La maintenance est définie comme étant :
« Ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé »

Norme AFNOR X 60-10

Maintenir c'est donc effectuer des opérations (changement des pièces, graissage, visite, entretien, amélioration, etc.) qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la continuité et la qualité de la production.

Maintenir \Longrightarrow état de stabilité

Bien maintenir, c'est assurer ces opérations au coût globale optimum

1.2. La fiabilité

La fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise dans des conditions données et pendant un intervalle de temps donné.

1.2.1 Indicateurs de fiabilité λ et MTBF:

MTBF ou moyenne des temps de bon fonctionnement

Définition : La MTBF (Mean Time Before Failure) représente la moyenne des temps de bon fonctionnement entre deux défaillances d'un système réparable ou le temps moyen entre défaillances [Bleu, 00] . $MTBF = 1/\lambda$

λ et le MTBF sont les deux principaux indicateurs de la fiabilité utilisés industriellement.

Taux de défaillance λ

Définition : λ représente le taux de défaillance ou le taux d'avarie. Il caractérise la vitesse de la variation de la fiabilité au cours du temps. Pour une période de travail donnée, durée totale en service actif :

$$\lambda = \frac{\text{nombre totale de défaillance pendant le service}}{\text{durée totale de bon fonctionnement}} \text{ [N}^{\text{bre}} \text{ de défaillance/heure]}$$

Tel que la durée totale de bon fonctionnement est égale à la durée totale en service moins la durée des défaillances.

1.3. La Maintenabilité

La maintenabilité est l'aptitude d'une entité à être maintenue ou rétablie, sur un intervalle de temps donné et dans des conditions d'utilisations données, dans un état dont lequel elle peut accomplir une fonction requise.

1.3.1 Indicateurs ou critères de maintenabilité MTTR et μ

La maintenabilité s'exprime à l'aide du MTTR (mean time to repair). Pour un dispositif donné, le MTTR représente la moyenne des temps de réparation.

$$MTTR = \frac{\text{Somme des temps de réparation}}{\text{Nombre de réparation}} = \text{temps moyen de réparation}$$

μ représente le taux de réparation, si μ est constant au cours du temps, alors :

$$\mu = \frac{1}{MTTR}$$

1.4. La Disponibilité

La disponibilité est l'aptitude d'une entité, sous les aspects combinés de sa fiabilité, de sa maintenabilité et de sa logistique de maintenance, à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires soient assurées.

1.5. La sécurité

La sécurité est l'aptitude d'une entité à éviter de faire apparaître, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques.

1.6 Les différentes formes de la maintenance

Il existe trois types de la maintenance

- La maintenance corrective
- La maintenance systématique } maintenance préventive
- La maintenance conditionnelle }

Ils peuvent être schématisés par le synoptique représenté par **la figure 3.1** :

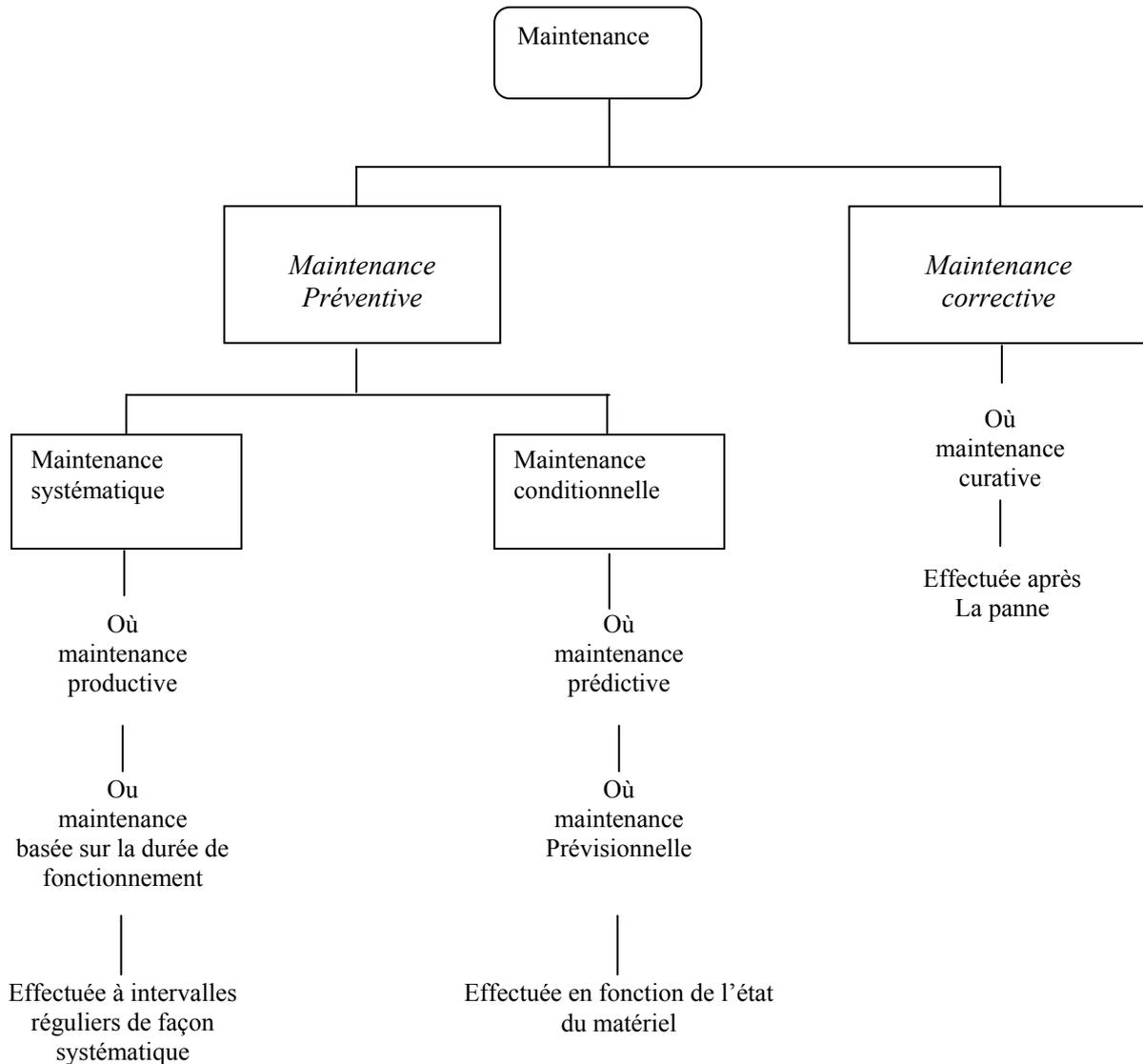


Figure 3.1 Les différentes formes de la maintenance

2. la maintenance corrective

2.1. Définition

Il s'agit d'une « maintenance effectuée après défaillance » **Norme AFNOR X 60-10**. C'est une politique de la maintenance (dépannage ou réparation). Qui correspond à une attitude de réaction à des événements plus ou moins aléatoires et qui s'applique après la panne. Ce qui ne veut pas dire obligatoirement que celle-ci n'a pas été « pensée ». C'est un choix politique de l'entreprise qui malgré tout, nécessite la mise en place d'un certain nombre de méthodes qui permettent d'en diminuer les conséquences :

- Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC), c'est une méthode qui permet de mettre en évidence de façon prospective un certain nombre d'organe ou de machines critiques pour la sécurité et la fiabilité d'un système après inventaire des défaillances élémentaires possibles.
- Installation d'éléments de secours (redondance de matériels)
- Utilisations des technologies plus fiables
- Recherche des méthodes de surveillance les milieux adaptés aux points névralgiques (capteurs intégrés...)
- Utilisation des méthodes de diagnostics de pannes plus rapides (arbre des causes des défaillances, historique des pannes, système expert...)

3. La maintenance systématique

3.1 Définition

Selon la norme **AFNOR X 60-10**, nous citons les définitions suivantes :

Maintenance préventive : « maintenance effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien »

Maintenance systématique : « maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi en fonction du temps ou du nombre d'unité d'usage »

Maintenance productive : « expression d'origine amiricano-japonaise qui définit un type de maintenance préventive systématique organisée à partir d'un programme de production.

3.2. Pratique de la maintenance systématique

L'entretien intervient à intervalle fixé sur la base du minimum de vie des composants donnés par le constructeur. Ces intervalles sont souvent déterminés statistiquement comme étant la période (à partir de l'état neuf ou rénové) à la fin de laquelle le taux de pannes cumulées d'un type de machine n'excède pas 2,5%. C'est pourquoi ce type de maintenance est aussi appelé maintenance préventive basée sur **la durée de fonctionnement**

4. Maintenance conditionnelle

4.1. Définition

C'est une maintenance préventive subordonnée à un type d'évènement prédéterminé (autodiagnostic, information donnée par un capteur, mesure d'une usure, etc.) révélateur de l'état de dégradation d'un bien.

4.2 pratique de la maintenance conditionnelle

Un démontage, un remplacement coûtent cher en temps et en perte de production. La pratique de la maintenance conditionnelle consiste à ne changer l'élément que lorsque celui-ci présente des signes de vieillissement ou d'usure mettant en cause, à brève échéance, ses performances. La maintenance conditionnelle (appelée aussi parfois la maintenance suivant état de fonctionnement).

Comporte trois phases :

- La détection du défaut qui se développe ;
- L'établissement d'un diagnostic ;
- L'analyse de la tendance.

a) La détection du défaut qui se développe

A la mise en route de chaque équipement, les principales caractéristiques de base des appareils sont enregistrées, notamment la signature vibratoire et les divers paramètres de fonctionnement (température, performance...)

Ces caractéristiques ou signature, serviront de référence pour suivre par comparaison, l'évolution d'éventuels défauts ultérieurs.

b) L'établissement d'un diagnostic

Dès qu'une anomalie est détectée, le responsable d'entretien aura la charge d'établir, dans la mesure du possible, un diagnostic concernant l'origine et la gravité du défaut constaté.

c) L'analyse de la tendance

L'établissement du diagnostic permet à l'ingénieur de préjuger du temps dont il dispose, avant la panne, pour laisser l'appareil fonctionner sous surveillance renforcée et prévoir la réparation.

5. La surveillance dans la fonction maintenance

La surveillance dans la fonction maintenance est une évaluation permanente ou périodique de la situation réelle du niveau technique et organisationnel afin de mesurer les écarts entre la situation réelle du niveau technique et organisationnel afin de mesurer les écarts entre la situation réelle et prévue pendant le déroulement des travaux [Monc, 91].

Cette surveillance concerne principalement les délais fixés, les durées d'exécution et l'organisation du déroulement.

Les travaux de la maintenance doivent être surveillés pour :

- Assurer la réalisation correcte de l'exécution des activités de maintenance
- Respecter exactement les activités prévues.
- Diminuer les pertes de la production
- Utiliser les capacités d'une façon optimale.
- Maintenir le niveau des coûts requis- ou même économiser.

Après avoir présenter les principaux concepts de la maintenance, on va présenter dans le chapitre qui suit l'étude de cas qui consiste à mettre en valeur les RdP dans la modélisation d'atelier flexible afin d'étudier ses performances et voire le rôle que joue la maintenance préventive systématique dans le système de production.

1. Description de l'atelier flexible de l'étude de cas

On va traiter dans cette partie un atelier flexible de type Job-Shop existant, en lui intégrant le modèle de la maintenance préventive ; on va d'abord considérer les tâches de production puis tenir compte des tâches de la maintenance préventive, pour veiller que l'atelier ne tombe pas en panne, donc on va solutionner un problème d'ordonnancement.

1.1 Atelier de type job-shop

L'atelier job-shop est conçu pour fabriquer plusieurs produits différents [Tech, 06]. Il dispose de plusieurs machines. La fabrication de chaque type de produit est réalisée par le passage de ce produit sur certaines des machines, les produits n'ont pas tout le même ordre de passage.

a) Eléments constitutifs de l'atelier flexible et leur disposition

L'atelier considéré est composé de quatre machines (**figure 4.1**) ; un tour à commande numérique (M_1), une fraiseuse (M_2), une Rectifieuse (M_3) et deux tapis roulants.

Un robot (R_1) qui charge la machine M_1 , et un robot (R_2) qui décharge les pièces de la machine M_1 et qui charge la machine M_2 , et un robot (R_3) qui décharge la machine M_2 et qui charge et décharge la machine M_3 sur le deuxième tapis roulant.

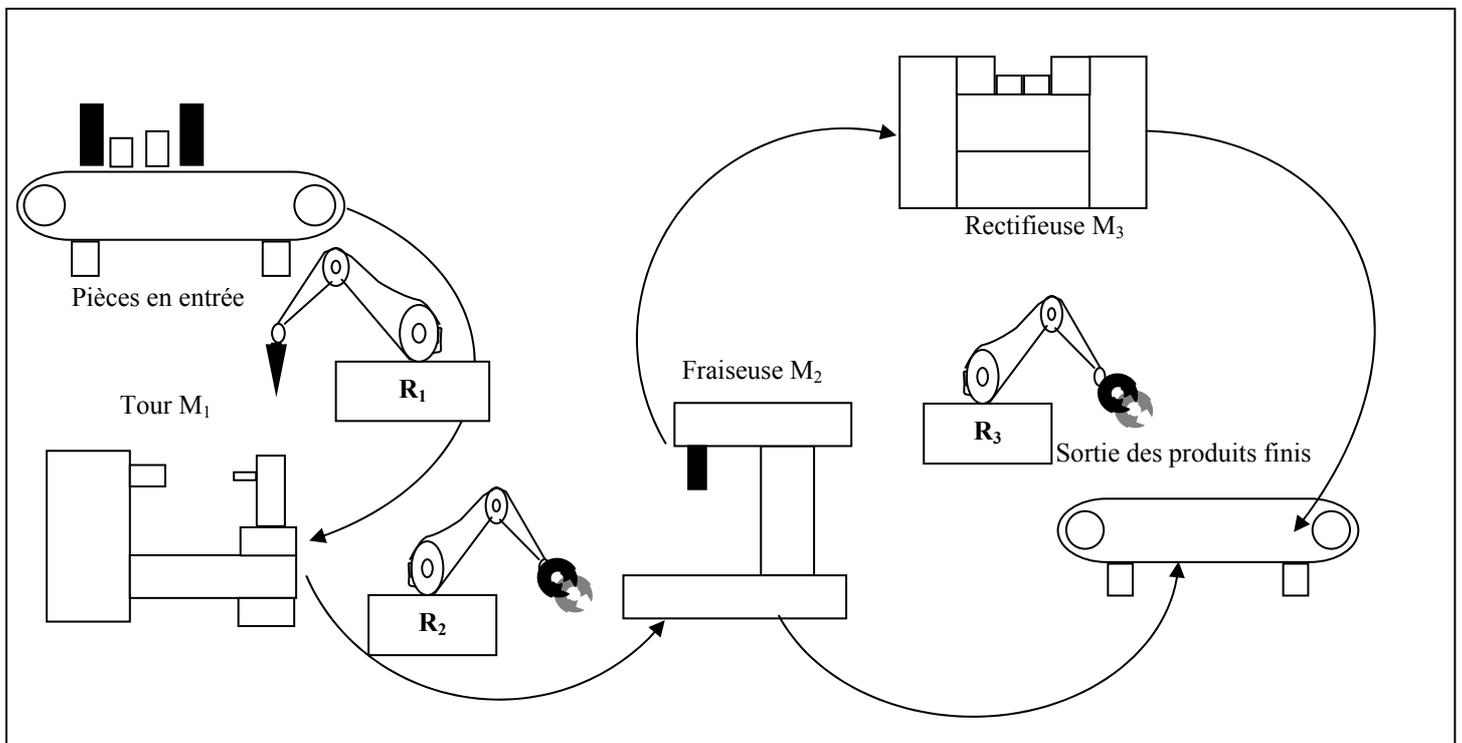


Figure4.1. Atelier de fabrication

b-Cycle de fonctionnement

Cet atelier doit produire des **perforatrices de bureau** ; le corps de perforatrice est constitué de l'assemblage de deux **demi-coquilles** rigoureusement identiques, et le **poinçon**. Chaque demi-coquille est obtenue par une opération de tournage réalisée sur le tour à commande numérique, suivie d'un ensemble d'opérations réalisées sur une fraiseuse.

Le poinçon est obtenu par une opération de tournage, suivi d'une opération de fraisage. Il passe ensuite sur la rectifieuse qui termine sa préparation. Le poinçon emmanché en force dans un **bouton** permettant d'actionner la perforatrice ; le bouton subit une opération de tournage puis une opération de fraisage.

Le robot (R_3) décharge M_2 . Si la pièce intermédiaire est un poinçon, il la charge sur la rectifieuse M_3 , sinon, il la dépose sur un tapis qui conduit la pièce à l'atelier d'assemblage. À la fin d'une opération de rectification, le robot R_3 décharge la rectifieuse M_3 et dépose la pièce sur le tapis roulant.

1.2 Modélisation de l'atelier

Désignation des paramètres et hypothèses

Pour simplifier notre étude, nous confondrons les opérations de chargements/déchargements des machines avec les opérations réalisées par ces machines. Ainsi par exemple, le travail de R_1 sera intégré à l'opération de tournage réalisée par M_1 .

Dans la suite on met les désignations suivantes :

N_1 : Produit brute destiné à être usiné pour réaliser le poinçon ou le poinçon lui-même en sortie de l'atelier.

N_2 : Produit brute destiné à être usiné pour réaliser le bouton ou le bouton lui-même en sortie de l'atelier.

N_3 : Produit brute destiné à être usiné pour réaliser les demi-coquilles ou les demi-coquilles elles même en sortie de l'atelier.

La perforatrice étant constituée de deux demi-coquilles, d'un poinçon et d'un bouton, il est clair que l'atelier devra produire à partir de 25% de N_1 , 25% de N_2 et 50% de N_3 .

Donc l'atelier travail avec le **ratio 1/1/2**, on suppose que les pièces entrent dans l'atelier selon la séquence $\sigma_0 = \langle N_3, N_1, N_2, N_3 \rangle$.

Le séquençement sur les machines (ordre de passage des pièces) est donné par les gammes suivantes :

$\sigma(M_1) = \langle N_3, N_1, N_2, N_3 \rangle$; $\sigma(M_2) = \langle N_3, N_1, N_2, N_3 \rangle$; $\sigma(M_3) = \langle N_1 \rangle$

Cette ligne de fabrication est associée à une gamme linéaire, les pièces visitent les machines dans l'ordre donné par les gammes suivantes

N_1 : $\langle M_1 (3), M_2 (1), M_3 (4) \rangle$

N_2 : $\langle M_1 (2), M_2 (2) \rangle$

N_3 : $\langle M_1 (1), M_2 (1) \rangle$

Les nombres entre parenthèses précisent la durée de l'opération considérée sur la machine correspondante. Par exemple $M_1(3)$ c à d : trois unité de temps.

Les gammes de fabrication sont représentées sur la **figure 4.2**.

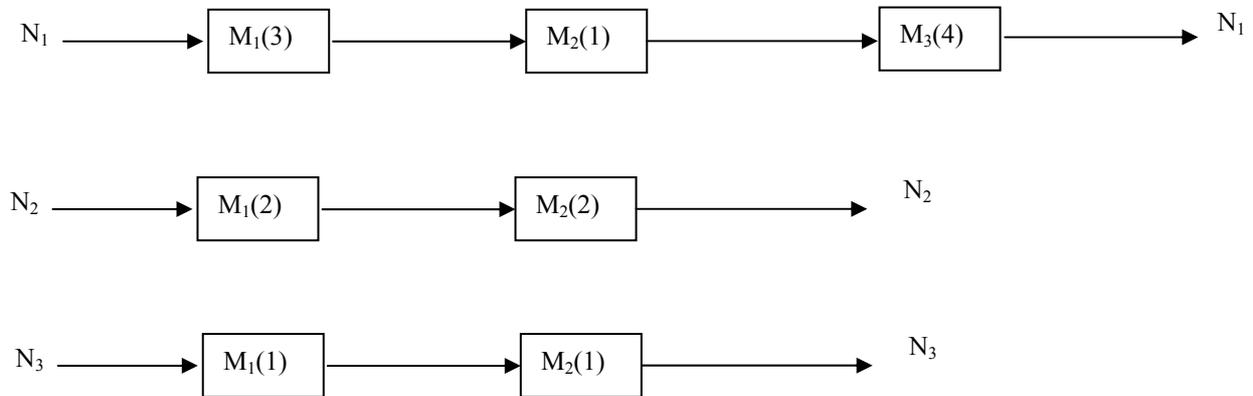


Figure4.2.Gamme de fabrication

-La première étape

On modélise par gamme de fabrication. Les modèles de ce module établit à l'aide des réseaux de Petri temporisés (T-temporisé) sont donné par la **figure4.3**. Pour cela chaque opération réalisée sur un produit dans sa gamme de fabrication est représentée par une transition **t**.

Les différentes transitions associées aux opérations successives que subit le produit sont séparées les unes des autres par des places symbolisant des moyens de stockages (désignées par B).

A chaque transition est associé un temps de franchissement, qui est égal au temps que prend la machine pour réaliser l'opération représentée par la transition.

Par exemple l'opération réalisée par la machine (M1) sur la pièce N_1 représentée par la transition $t_{1,1}$ prend 15 unités de temps ,pareillement pour les autres opérations.

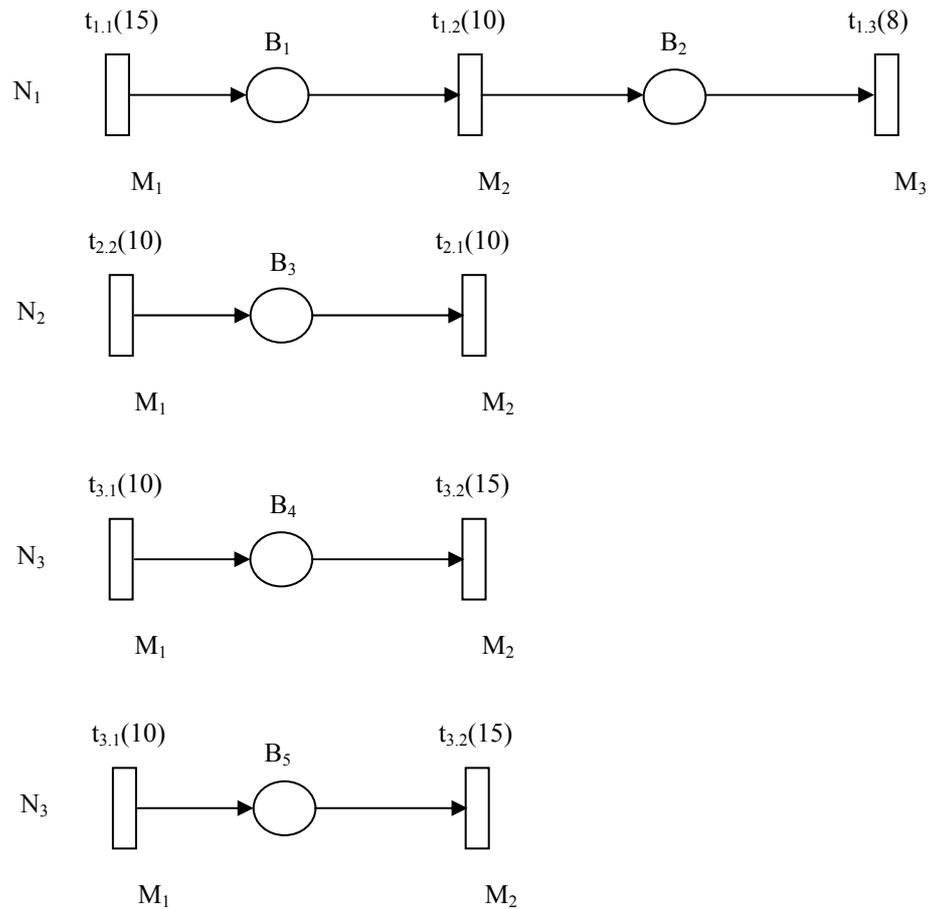


Figure 4.3 Les modèles des gammes de fabrication des produits N_1 , N_2 , N_3

-La deuxième étape

La seconde étape modélise le **mode opératoire cyclique de l'atelier** en supposant une nouvelle pièce rejoint le système dès qu'une pièce du même type est terminée. Les produits passent d'une station à l'autre. Ce transit est réalisé à l'aide d'un moyen de transport. La deuxième étape de la modélisation les représente. A chaque produit est associé un certain nombre de moyens de transport dans la séquence de fabrication. Lorsque la fabrication d'un produit est terminée, le moyen de transport qu'il utilise est libéré et il est supposé immédiatement disponible pour un nouveau transport. Une place supplémentaire vient augmenter le modèle précédent (par exemple la place P_1). Un jeton dans cette place symbolise un moyen de transport disponible (on peut le mettre dans les différents places supplémentaire dans le modèle qui suit) . Le recyclage des moyens de transport est symbolisé par un recyclage sur cette place des transitions d'entrées et de sorties du modèle précédent. Les circuits obtenus sont représentés par la **figure 4.4**. On les appelle **circuit de fabrication**.

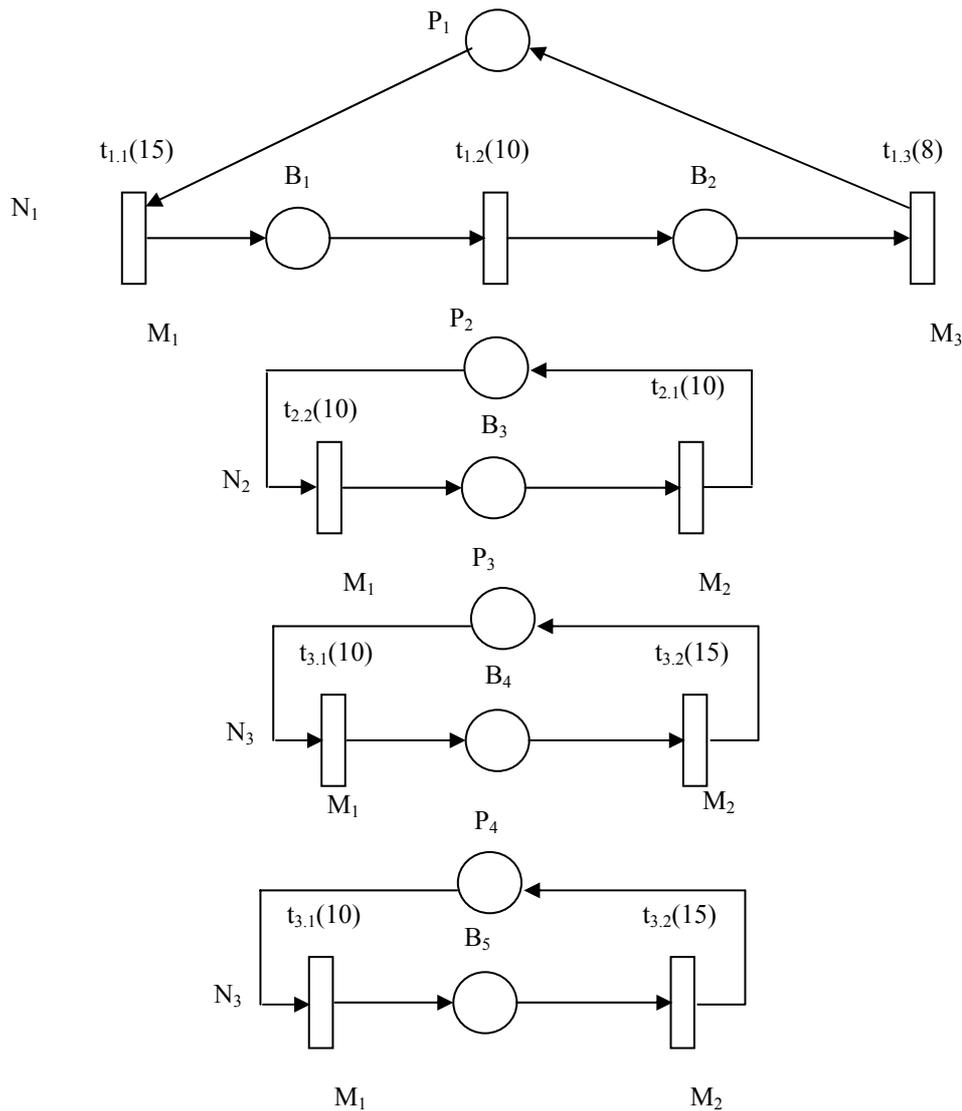


Figure 4.4 Le circuit de fabrication

-Troisième étape

La dernière étape introduit le séquençage des produits sur les machines. Cette étape résout le problème d'encombrement des pièces différentes dans la même machine, parce qu'on ne peut pas fabriquer deux ou trois pièces différentes simultanément dans la même machine donc pour compléter le modèle et éviter le problème de conflit on a ajouté un autre circuit qui indique l'ordre de passage des pièces dans les machines ; **les transitions** représentent les opérations exécutées par une machine donnée sont intégrée dans un nouveau circuit élémentaire. L'ordre de parcours du circuit élémentaire ainsi créé est l'ordre de transit des produits dans la machine comme il a été défini dans la séquence d'entrée. Ces nouveaux circuits sont représentés sur la **figure 4.5** On les appelle des **circuits de commande**.

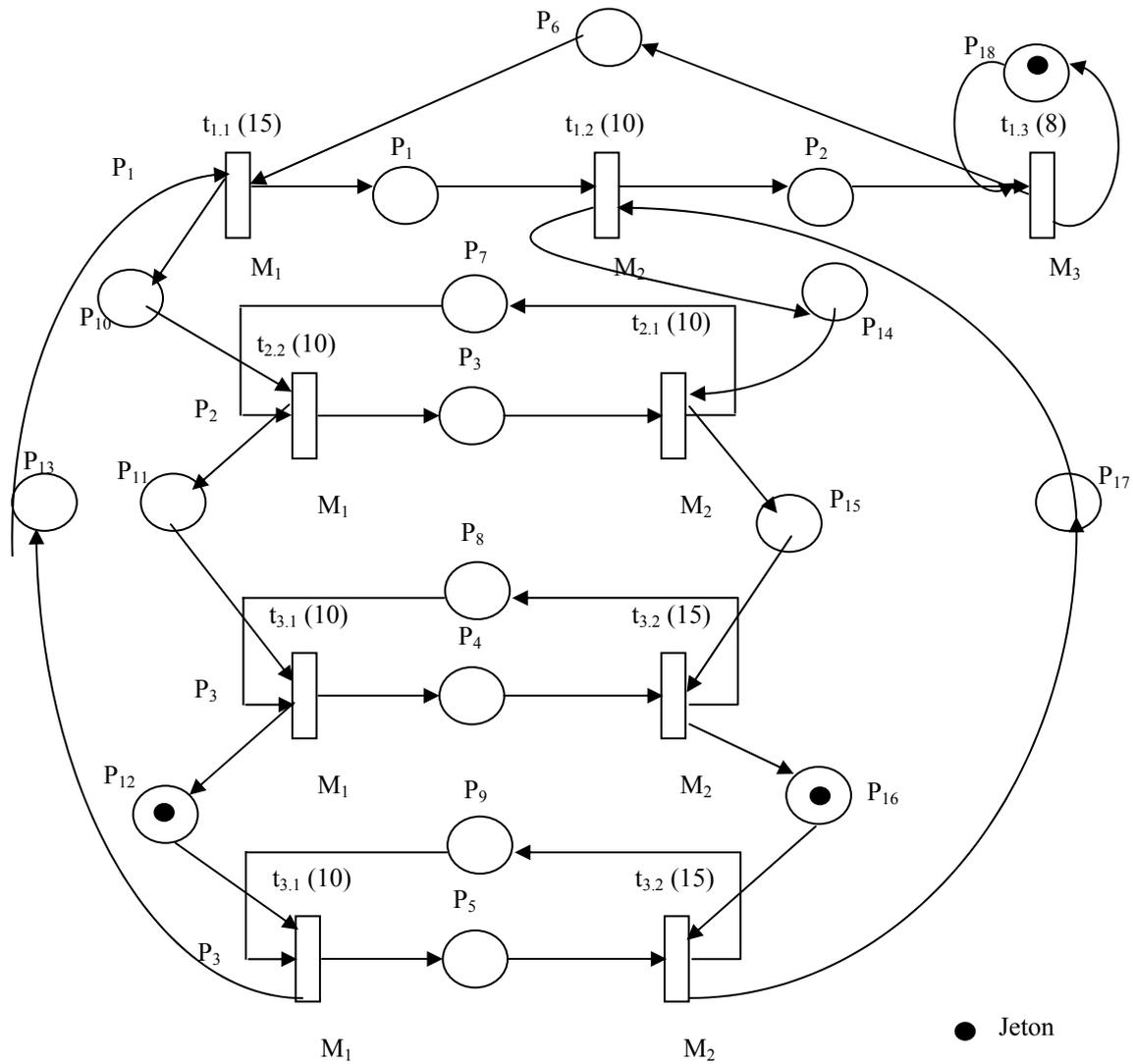


Figure 4.5 Le circuit de commande du job-shop

Remarque :

Le jeton dans le circuit de commande définit l'état de la machine, si elle est libre ou occupé.

Tables des places et des transitions

Tableau.IV.1 tableau des places

Place	Désignation
P₁	Disponibilité de la première pièce pour la machine M ₂
P₂	Disponibilité de la première pièce pour la machine M ₃
P₃	Disponibilité de la deuxième pièce pour la machine M ₂
P₄	Disponibilité de la troisième pièce pour la machine M ₂
P₅	Disponibilité de la quatrième pièce pour la machine M ₂
P₆	Disponibilité du Robot R₁ pour charger une autre pièce brute destinée pour former la première pièce dans la machine M ₁
P₇	Disponibilité du Robot R₁ pour charger une autre pièce brute destinée pour former la deuxième pièce dans la machine M ₁
P₈	Disponibilité du Robot R₁ pour charger une autre pièce brute destinée pour former la troisième pièce dans la machine M ₁
P₉	Disponibilité du Robot R₁ pour charger une autre pièce brute destinée pour former la quatrième pièce dans la machine M ₁
P₁₀	Disponibilité de la machine M₁ pour recevoir la deuxième pièce
P₁₁	Disponibilité de la machine M₁ pour recevoir la troisième pièce
P₁₂	Disponibilité de la machine M₁ pour recevoir la quatrième pièce
P₁₃	Disponibilité de la machine M₁ pour recevoir la première pièce
P₁₄	Disponibilité de la machine M₂ pour recevoir la deuxième pièce
P₁₅	Disponibilité de la machine M₂ pour recevoir la troisième pièce
P₁₆	Disponibilité de la machine M₂ pour recevoir la quatrième pièce
P₁₇	Disponibilité de la machine M₂ pour recevoir la première pièce
P₁₈	Disponibilité de la machine M₃ pour recevoir la première pièce

Tableau.IV.2 tableau des transitions

N°	Transitions	Désignations
1	t _{1,1}	Action de la machine M₁ sur la première pièce contenant l'opération de chargement et de déchargement du robot R₁
2	t _{1,2}	Action de la machine M₂ sur la première pièce contenant l'opération de chargement et de déchargement du robot R₂
3	t _{1,3}	Action de la machine M₃ sur la première pièce contenant l'opération de chargement et de déchargement du robot R₃
4	t _{2,1}	Action de la machine M₁ sur la deuxième pièce contenant l'opération de chargement et de déchargement du robot R₁
5	t _{2,2}	Action de la machine M₂ sur la deuxième pièce contenant l'opération de chargement et de déchargement du robot R₂
6	t _{3,1}	Action de la machine M₁ sur la troisième pièce contenant l'opération de chargement et de déchargement du robot R₁
7	t _{3,2}	Action de la machine M₂ sur la troisième pièce contenant l'opération de chargement et de déchargement du robot R₂
8	t _{4,1}	Action de la machine M₁ sur la quatrième pièce contenant l'opération de chargement et de déchargement du robot R₁
9	t _{4,2}	Action de la machine M₂ sur la quatrième pièce contenant l'opération de chargement et de déchargement du robot R₂

Pour bien maintenir le bon fonctionnement de l'atelier, on doit ajouter un modèle de la maintenance préventive (MP) ; le paragraphe suivant présente les différents types des modèles de la maintenance préventif existant et qu'elles sont les paramètres qui nous aident à choisir le réseau de Petri convenable au modèle de la MP

1.3 Modélisation de la maintenance préventive

1.3.1 Choix du type de réseau de Petri

Un modèle de maintenance préventive se lance suite à une information, que ce soit, une occurrence d'une date de maintenance suivant un programme établi ou nom, ou bien une indication de vieillissement d'une machine, etc. dans tous les cas c'est un événement extérieur au modèle (occurrence d'une date MP), qui détermine le début de la MP.

Dans notre travail nous nous intéressons tout d'abord aux réseaux de Petri Temporisé (RdPT) puisqu'ils permettent de modéliser les temps opératoire des tâches de maintenance. En effet, la construction du modèle nécessite souvent l'utilisation simultanée de transition immédiates (RdP autonome), et des transitions temporisées déterministe (RdP non autonome) ainsi que les arcs pondérés (la pondération représente la quantité des ressources utilisés pour chaque tâche de maintenance, la pondération doit être supérieure ou égale à cette extension appelée les RdPT Généralisés (RdPTG).

Les règles d'évolution débouchent sur deux types de marquages. Le premier est dit *instable* lorsque il valide des transitions immédiates, le temps de séjour de ce marquage, étant infiniment petit, est considéré comme nul. Le deuxième marquage est dit *stable* lorsqu'il valide des transitions temporisées.

Tant que le franchissement d'une transition est conditionné par l'occurrence d'un événement extérieur, on est en présence d'une *synchronisation*. Cet événement est représenté à l'aide d'une expression logique de variable booléenne (ou binaire).

On a introduit un nouvel outil qui s'appelle les RdPTGS combinant à la fois les RdPTGS combinant à la fois les RdP autonomes (notion de transition immédiate), les RdP non-autonomes Temporisés (notion de transition temporisée) et les RdP non-autonomes synchronisés (notion de signal de synchronisation). Cet outil permet de modéliser des tâches de la MP.

1.3.2 Définition formelle du modèle

On définit un RdPTGS (R) par un cinq-uplet $R = \langle P, T, [w], Mo, \Delta \rangle$

Tel que :

$P = \{ P_1, \dots, P_n \}$ est un ensemble fini et non vide des places de R.

$T = \{ T_1, \dots, T_m \}$ est un ensemble finis et non vide des transitions de R.

$[W] = P \times T \longrightarrow \{ -1, 0, 1 \}$ est l'application d'incidence de r (avec $1 > 0$ qui représente le poids de l'arc)

$Mo = \{ Mo(P_1), \dots, Mo(P_n) \}$ est l'ensemble de marquage initial des places.

$\Delta = \{ d_1, \dots, d_m \}$ est l'ensemble des temporisations associées aux transitions.

1.3.3 Modèle RdP de référence du modèle de la MP

1.3.3.1. Modélisation de la MP Sans tenir compte des ressources

Nous construirons un modèle générique de référence d'une MP

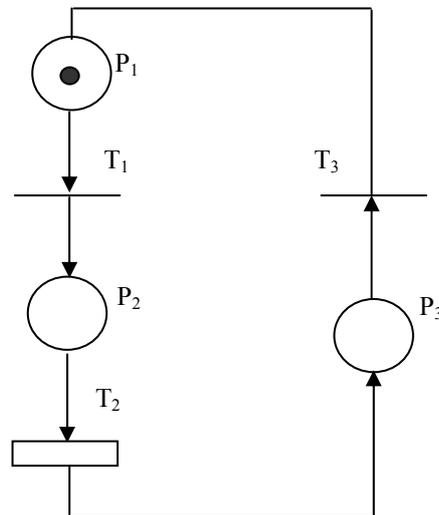


Figure 4.6 Modèle de MP sans tenir compte des ressources

P_1 : représente le service maintenance préventive en repos.

P_2 : représente le service maintenance préventive en action.

P_3 : représente le service maintenance préventive une fois l'action terminée.

T_1 : début de l'action de la maintenance préventive.

T_2 : exécution d'une action de la maintenance préventive, et qui doit être temporisée

T_3 : fin de l'action de la maintenance préventive.

A la fin de l'exécution de la tâche de la MP (jeton à P_3), la transition (T_3) sera franchit et permettra de libérer le service maintenance (P_1).

Formellement, ce modèle générique s'écrit $R = \langle P, T, [W], Mo, \Delta, \rangle$

Avec :

$$P = \{ P_1, P_2, P_3 \}$$

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

$$T = \{ T_1, T_2, T_3 \}$$

$$\mathbf{M}_0 = \{ 1, 0, 0 \}$$

$$\Delta = \{ 0, t, 0 \}$$

t : temps opératoire de la tâche de MP

1.3.3.2. Modélisation de la MP en tenant compte des ressources

« Une ressource est un moyen technique ou humain destiné à être utilisé pour la réalisation d'une tâche et disponible en quantité limitée ». [Benn, 00].

On distingue deux types des ressources :

a. Les ressources renouvelables

Ce type de ressource est réutilisable, par exemple (machine, homme, etc.).

b. Les ressources consommables

La consommation de la ressource est considérée comme une contrainte en plus de sa disponibilité. Par exemple citons les matières premières et le financement.

Les ressources, qu'elles soient humaines ou matérielles sont indispensables pour la fonction maintenance. Cependant, les coûts qu'elles engendrent exigent une meilleure exploitation et une affectation optimale des ressources en raison des conflits qui surviennent quand une ressource est sollicitée par plus d'une machine.

La résolution de ce conflit prend en considération les différents types de ressources.

Cette notion de conflit est relative à une décision à prendre, selon des critères imprévus.

Chaque tâche de maintenance nécessite l'utilisation d'un ou plusieurs types de ressources.

En terme de modèle on peut présenter les ressources comme des places contenant chacune un nombre de jetons, ce nombre signifie la quantité disponible d'une telle ressource.

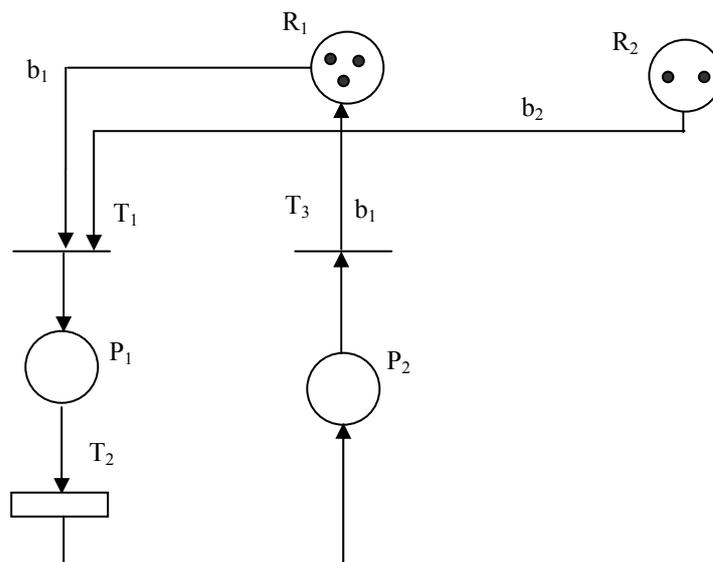


Figure4.7 Modèle de MP tenant compte des ressources

R₁ : représente le premier type de ressource (le nombre de jetons représente la quantité disponible du premier type de ressources). C'est une ressource renouvelable (le poids b_1 des arcs en avals est égal au poids des arcs en amonts). **Ex** : ressources humaines.

R₂ : représente le deuxième type de ressources. C'est une ressource consommable (il n'y a que des arcs en avals –de poids b_2 , le poids des arcs amonts est considéré comme nul) par exemple : la matière première.

P₁ : représente le service maintenance préventive en action.

P₂ : représente le service maintenance préventive une fois l'action terminer.

T₁ : début de l'action de maintenance préventive.

T₂ : exécution de l'action de la maintenance préventive.

T₃ : fin de l'action de la maintenance préventive.

Ce modèle a la même démarche que le modèle précédent, seulement ici (**T₃**) permet de libérer le service maintenance et les ressources.

Formellement, le nouveau modèle s'écrit **R**=<**P**, **T**,**[W]**,**Mo**, **Δ** >

Avec :

$$\mathbf{P} = \{\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2\}.$$

$$\mathbf{T} = \{\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \mathbf{T}_3\}.$$

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \\ b_1 & 0 & -b_1 \\ b_2 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{Mo} = \{0, 0, 3, 2\}$$

$\Delta = \{0, t, 0\}$. t : représente le temps opératoire de la tâche de la MP.

Un exemple appliqué à une machine est décrit dans la figure 4.8 :

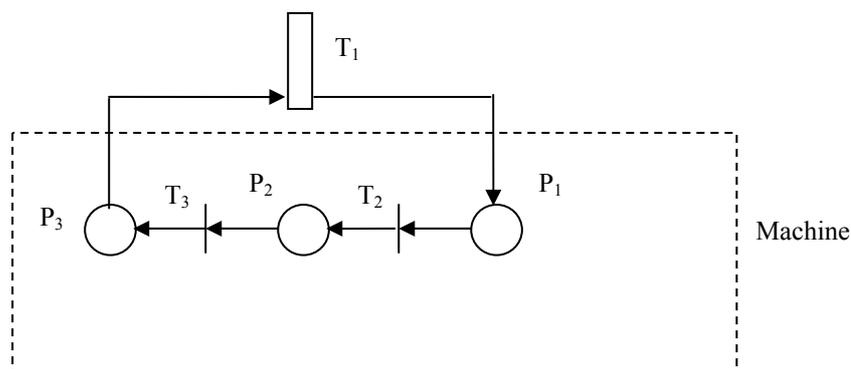


Figure 4.8 Modèle de la machine

T₁ : représente une tâche de production exécutée par cette machine.

P₁ : la machine est prête pour exécuter une tâche de la MP.

P_2 : il n'y a pas une occurrence de la MP.

P_3 : la machine est prête pour exécuter une tâche de production.

T_2 : début d'exécution d'une tâche de la MP.

T_3 : exécution de la tâche de la MP

Le tableau si dessous présente les tâches de maintenance effectuée aux différentes machines, on prend ces tâches à titre d'exemple pour éclaircir notre approche :

Tableau.IV.3 Tâches de la MP

Machine	Tâche	Organe concerné	Périodicité de la tâche	Durée de la tâche	Ressource renouvelable	Ressource consommable
Tour à commande numérique (M₁)	Rechanges des roulements (TMP _{1,1})	Moteur	4ans	6h	2 Mécaniciens + 1opérateur	Outils et accessoires
M₁	Nettoyage et vérification d'usure (TMP _{1,2})	Membrane	1 an	4h	2 Mécanicien	Outils et accessoires
fraiseuse (M₂)	Contrôle de l'état d'usure (TMP ₂₁)	Chariot	6 mois	2 h	1 Mécanicien	Outils et accessoires
Rectifieuse (M₃).	Contrôle le niveau d'huile (TMP ₃₁)	Moteur	1 mois	1 h	1 Mécanicien	Outils et accessoires

1.4 Modèle Combinatoire Production / Maintenance

Le modèle de la figure 4.9 présente la modélisation de la production qui tient compte de la MP Dans ce modèle on a introduit deux tâches de la maintenance préventive, la tâche TMP_{1,1} qui est appliquée à la machine **M1** (le tour) et la tâche TMP₃₁ qui est appliquée à la machine **M3** (la rectifieuse).

Notre souci dans cette modélisation est d'appliquer les tâches de la maintenance préventive aux machines sans perturber la production c'est à dire il faut que les machines ne soient pas occupées par une tâche de la production et que la production s'arrête pendant l'exécution de la tâche de la MP et qu'elle reprend ses activités à la fin de la tâche de la MP. Donc on a met un jeton dans la place P13, ce jeton indique que la machine M1 est Libre de toutes tâche de production c-à-d un arrêt de la production et que la machine est prête d'exécuter une tâche de la maintenance préventive.

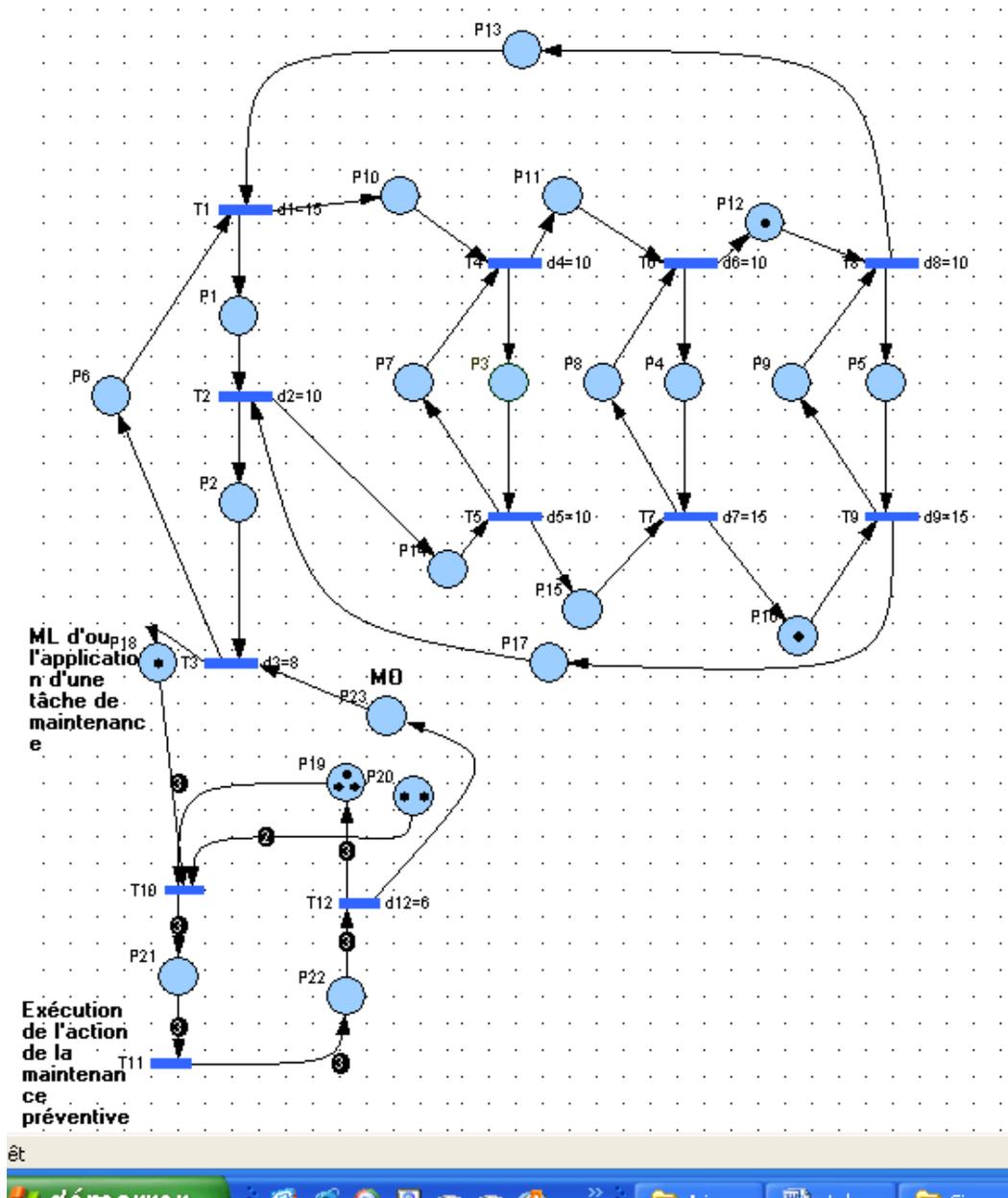


Figure 4.9 Modèle de la production avec une tâche de la maintenance préventive

Par la suite on introduit le modèle de la maintenance préventive à la machine M1 (le tour) avec l'indication de la date fixée selon la périodicité de la tâche.

La dernière étape de modélisation est comment savoir la fin d'exécution de la tâche de la MP pour déclancher la production pour cela on ajoute une place dans le modèle de la figure 4.9, qui est la place P23, quand elle reçoit un jeton ce dernier signifie la fin de tâche de la MP et la machine sera prête d'exécuter la tâche de la production.

Cette représentation est valable pour toutes les tâches de la MP restantes.

Pour exécuter n'importe qu'elle tâche de la MP il faut que la machine soit libre en affectant un jeton à la place concernée.

Pour planifier toutes les tâches de la maintenance on peut les mettre toutes dans le même modèle avec l'indication de la date prévue de chaque tâche.

1.5 Validation du modèle

Dans la validation du modèle nous chercherons à définir les propriétés du modèle et l'évaluation de ses performances, qui nous seront utiles pour introduire certains paramètres dans le logiciel qui nous permet de faire la simulation.

Mais avant de faire la validation du modèle, on va vérifier les propriétés du réseau tel que définit dans le chapitre II..

1.5.1 Propriétés du modèle de la production

Matrice d'incidence du modèle W

On a: $W=W^+ - W^-$

W^+ : Matrice d'incidence **arrière**

W^- : Matrice d'incidence **avant**

$$W^+ = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

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

$$W = \begin{matrix} & t_1 & t_2 & t_3 & t_4 & t_5 & t_6 & t_7 & t_8 & t_9 & & \\ \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \\ P_8 \\ P_9 \\ P_{10} \\ P_{11} \\ P_{12} \\ P_{13} \\ P_{14} \\ P_{15} \\ P_{16} \\ P_{17} \\ P_{18} \end{matrix} & \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & P_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & P_5 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_6 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & P_8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & P_9 \\ 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{10} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & P_{12} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{13} \\ 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & P_{15} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & P_{16} \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & P_{17} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{18} \end{pmatrix} \end{matrix}$$

– ***la bornitude:***

Toutes les places du réseau sont 1_ bornées donc on déduit que le RdP est 1_ borné c-à-d qu'il n'y a pas une accumulation en cours dans le système de production.

– ***la vivacité:***

Toutes les transitions sont vivantes; il n'y a pas de blocage, donc le RdP est vivant.

– ***la propriété graphe d'état:***

Le RdP n'est pas un graphe d'état. Si on veut qu'il soit un graphe d'état, il faut que toutes les transitions aient exactement une place d'entrée et une place de sortie, et ce n'est pas le cas dans notre modèle.

– ***la propriété graphe d'évènement:***

Le RdP est un graphe d'évènement. Parce que toute place a exactement une transition d'entrée et une transition de sortie

1.5.2 Simulation

. Dans notre étude de cas de l'atelier nous avons utiliser le "logiciel d'aide à l'évaluation des performances des systèmes de production modélisés par les réseaux de Petri "Sirphyco" (représentation et description du logiciel est dans l'annexe 2).

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

a) Modèle de la production

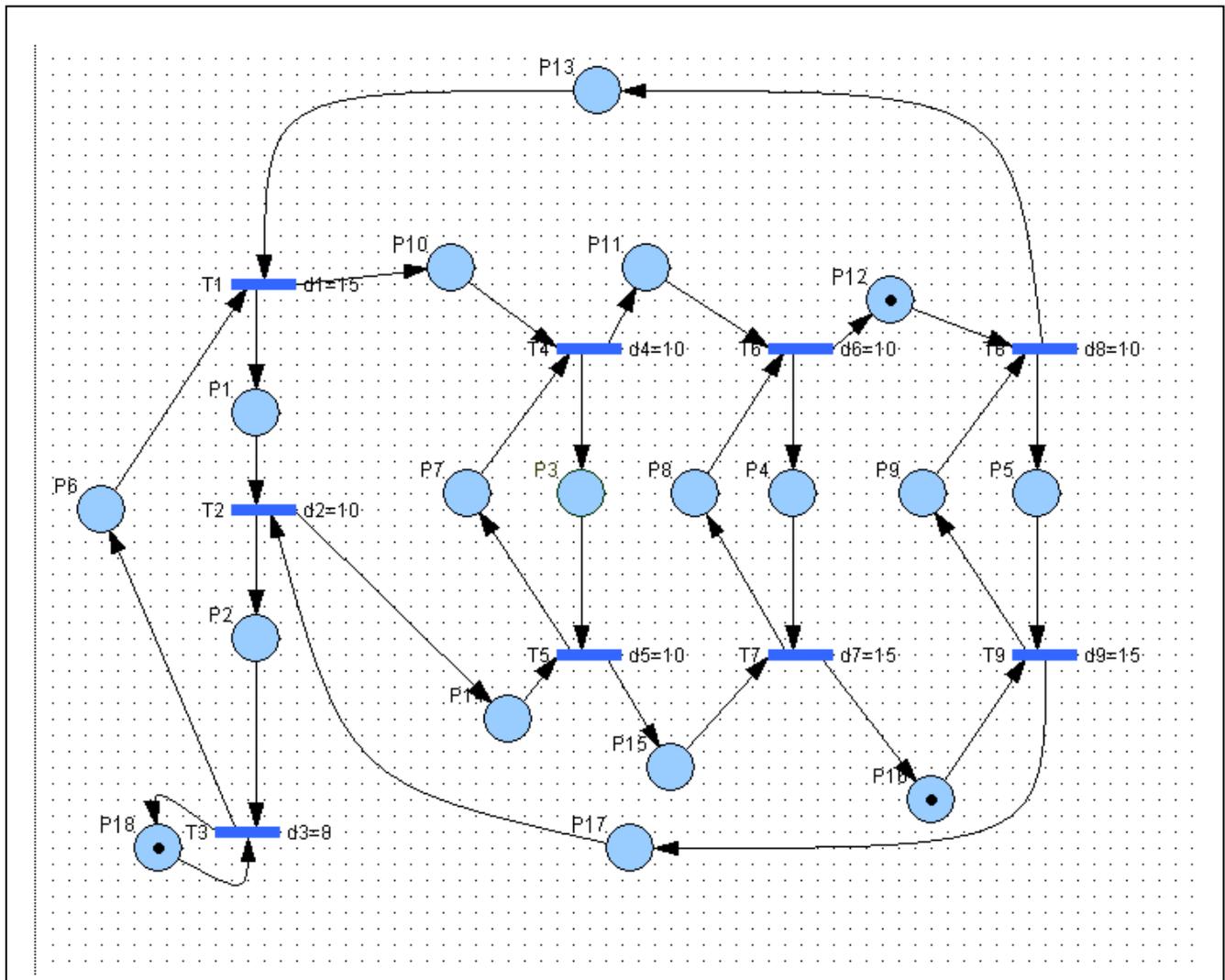


Figure 4.10 Simulation du Job-Shop

Résultats de la simulation

Le logiciel SIRPHYCO nous a permis d'abord de vérifier un certain nombre de propriétés des RdP du modèle puis utiliser pour la simulation

La simulation nous a permis d'identifier les conflits dans le modèle s'il y en a et de pouvoir les corriger. Le logiciel nous a permis de vérifier que le réseau de Petri est ordinaire, simple, un graphe d'évènement, à choix libre et qu'il est sans conflit.

Il n'y a pas d'évolution du nombre de marquage dans le modèle représenté par la figure 4.10 donc il est conservatif.

Analyse

Pour quoi le modèle du job-shop est resté conservatif ?

On voit que l'atelier a effectué un seul cycle de fabrication.

Pour effectuer plusieurs cycles il faut qu'on change le marquage de l'atelier, et se concentrer sur les places de recyclage des pièces c-à-d les places **P6**, **P7** et **P9** et le marquage devient selon la figure 4.11.

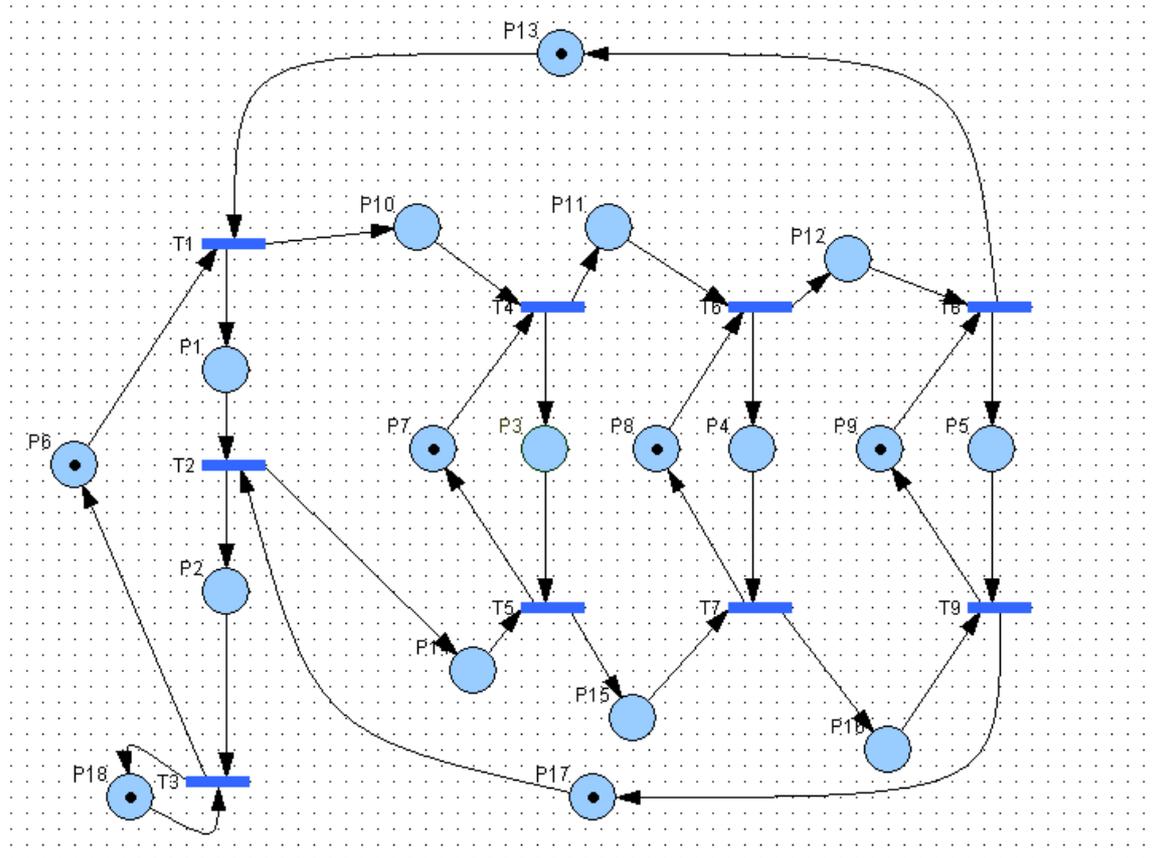


Figure 4.11 Simulation du job-shop pour le recyclage des pièces.

Après la simulation c-à-d après le franchissement de la transition **T1** la machine **M1** est prête pour fabriquer une autre pièce de la première gamme

Ensuite la transition **T4** sera franchie pour l'exécution d'une autre pièce de la deuxième gamme. Et pour la transition **T2** il faut qu'elle soit franchie de la place **P1** et de la place **P17** pour qu'elle soit prête pour exécuter une autre pièce de la première gamme. Et ainsi de suite pour tout l'atelier suivant l'ordre chronologique du modèle du réseau.

Le marquage dans les places **P6**, **P7**, **P8** et **P9** indique que le moyen de transport (le robot) est disponible pour charger une autre pièce pour la machine **M1**

La figure 4.12 montre que le robot a chargé la première machine lors du franchissement de la transition T1.

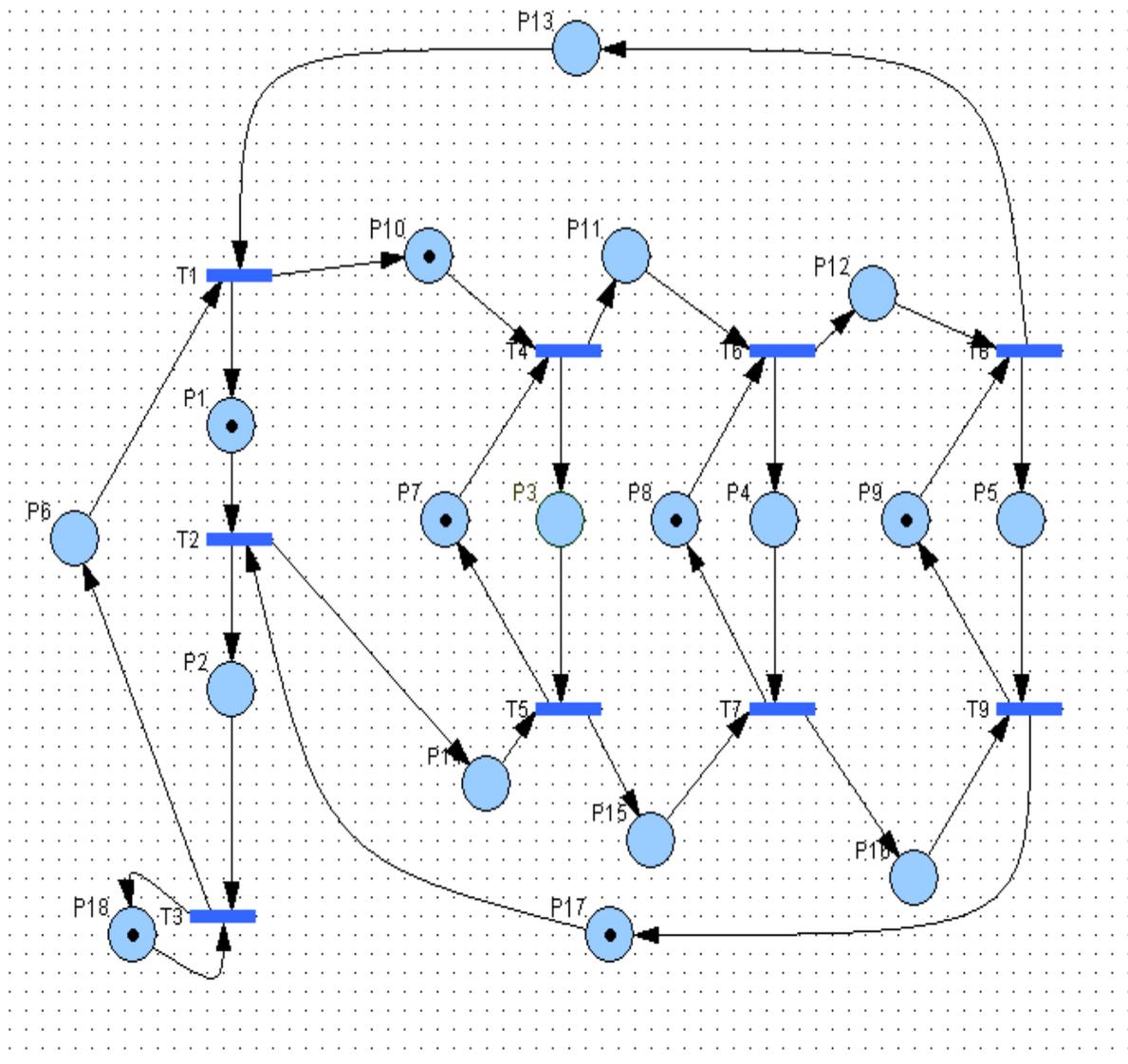


Figure 4.12 Le job-shop après le franchissement de la transition T1

Comportement du modèle

On suit le comportement de l'atelier par l'évolution du marquage qui est comme suit :

$$M0 = \{0,0,0,0,0,1,1,1,1,0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1\}$$

$$M1 = \{1,0,0,0,0,0,1,1,1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1\}$$

$$M2 = \{1,0,1,0,0,0,0,1,1,0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 1\}$$

$$M3 = \{1,0,1,1,0,0,0,0,1,0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 1\}$$

$$M4 = \{0,1,1,1,0,0,0,0,1,0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 1\}$$

M5= M0, cela nous ramène à la première étape, donc on déduit que le comportement de notre modèle est effectué en cinq étapes, de Mo à M4 en respectant la synchronisation des tâches

b) Modèle de la maintenance préventive

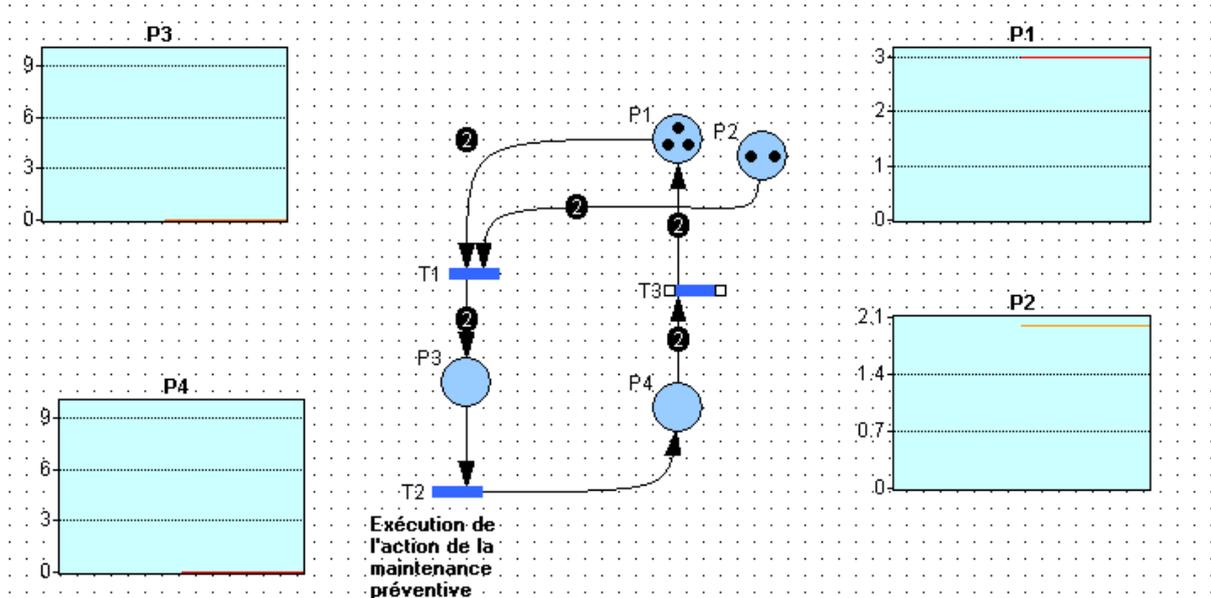


Figure 4.13 Modèle de la MP à l'étape initiale

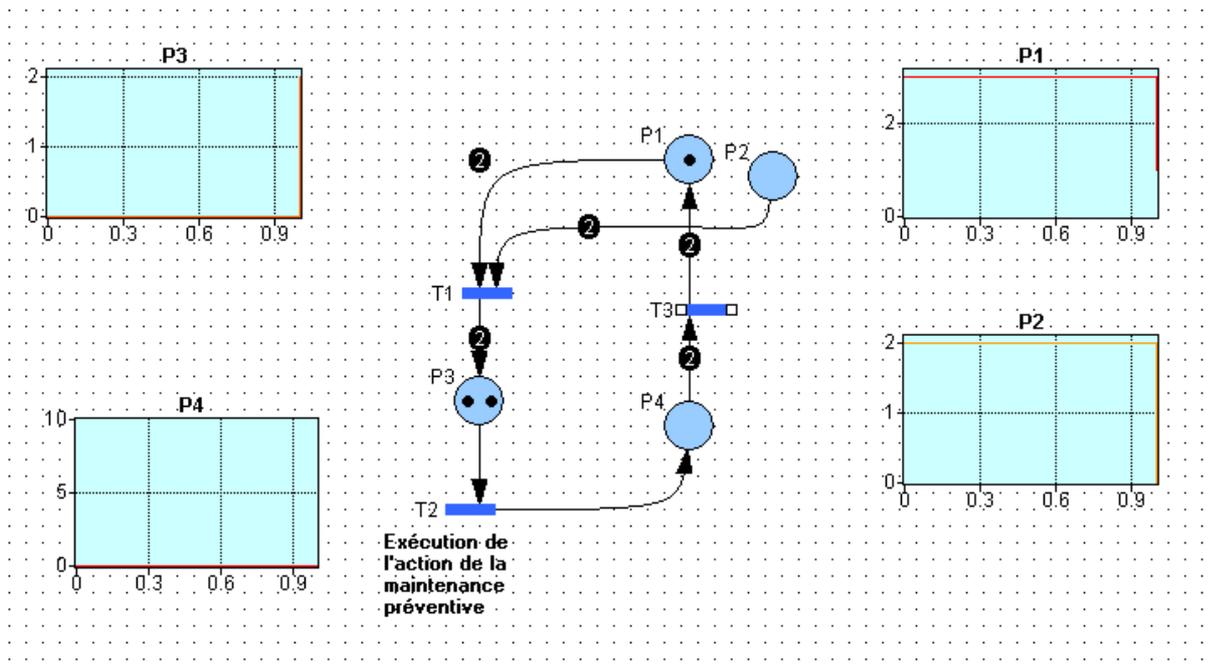


Figure 4.14 Validation de la transition T1

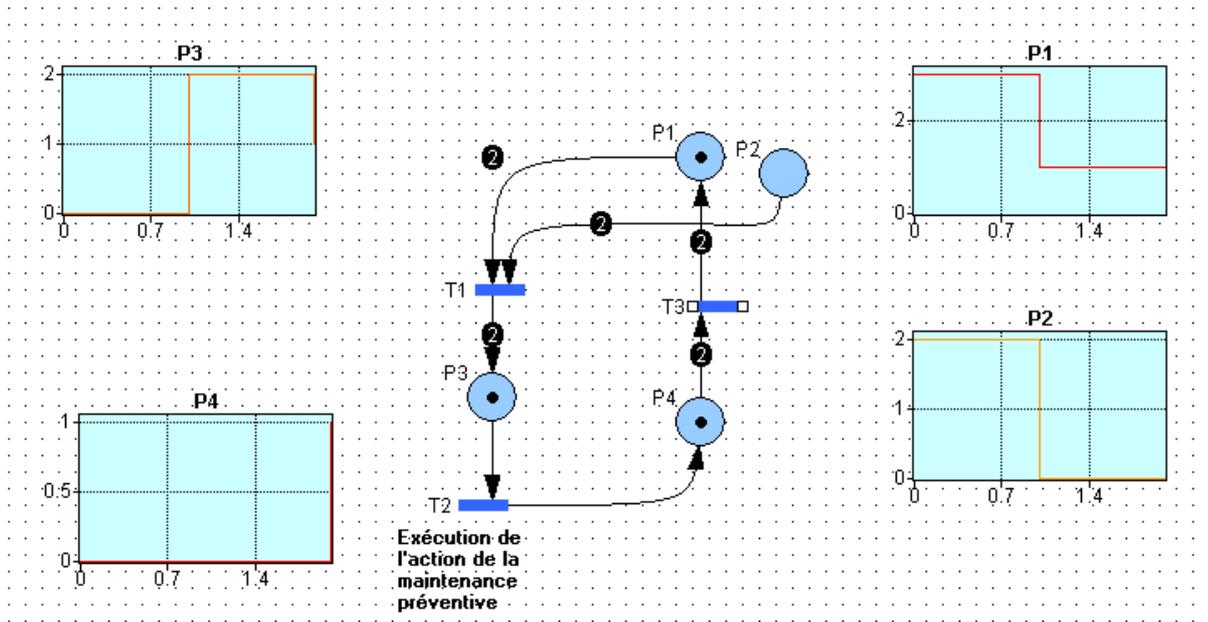


Figure 4.15 Validation de la transition T2

Remarque

Le schéma de la figure 4.12 représente le marquage de chaque place à l'étape initiale des tâches de la maintenance préventive, on considère que c'est la première tâche appliquée à la première machine.

Le poids de l'arc des ressources consommables est 2 par 0.

Le poids de l'arc des ressources renouvelables est 2 par 2.

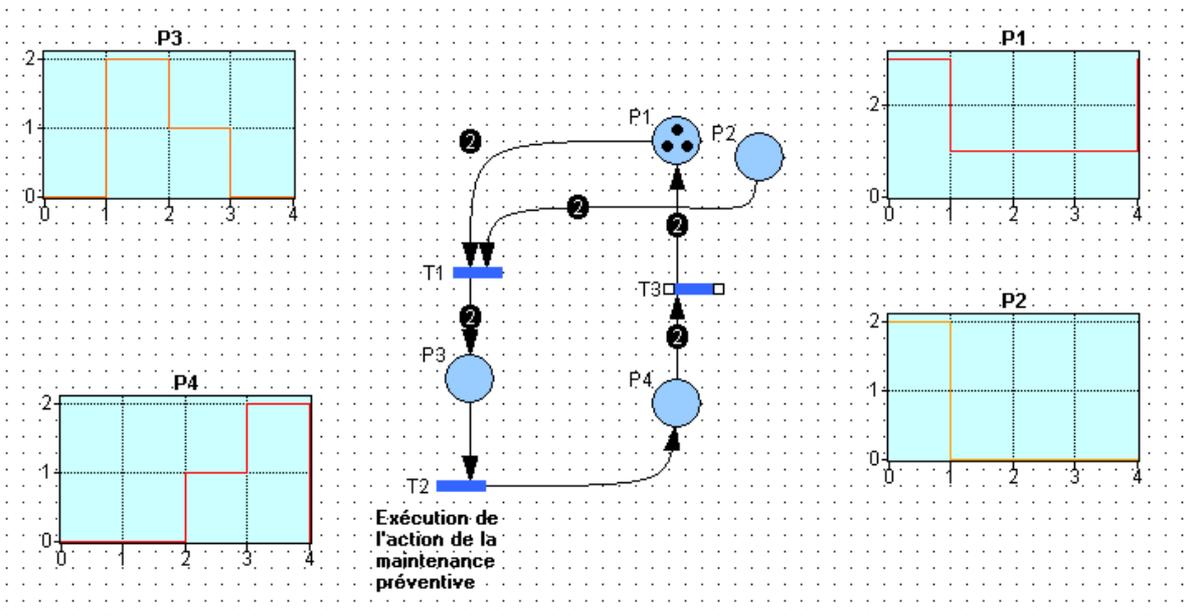


Figure 4.16 Validation de la transition T3

Résultats de la simulation

Grâce au logiciel Sirphyco, qui nous a permis de confirmer un certain nombre de propriétés et particulièrement s'il n'y a pas de conflit dans notre modèle. Les résultats obtenus sont les suivants :

- Le marquage après le premier pas de la simulation montre que $P(1)=1$ et $P(2)=0$ et $P(3)=2$ et $P(4)=0$ (Figure 4.14), cela signifie le début d'exécution de la tâche de la MP avec le franchissement de la transition T1 par les ressources consommables qui sont consommées à la première validation et les ressources renouvelables qui se renouvèlent dans la place P (3).
- Le marquage après le deuxième pas montre le franchissement de la deuxième transition par un seul jeton parce que le poids de l'arc est égale à 1 (Figure 4.15).
- La troisième et la quatrième étape déterminent la fin de franchissement de la deuxième transition par le second jeton, et le franchissement de la troisième transition comme le montre la Figure 4.16.

Interprétation des résultats

Le marquage dans le modèle de la MP désigne le nombre de ressources.

Les ressources consommables seront utilisées et consommées contrairement aux ressources renouvelables qui se renouvellent à chaque étape de la simulation parce qu'il faut les utiliser pendant l'exécution de la tâche de la MP.

L'évolution du nombre de marquage dans les places dans le système est arbitré par le poids de l'arc si le poids de l'arc est égale à **1**, la transition franchie un seul jeton (ex : la place **P4**), s'il est égale à **2** la transition franchie deux jetons (ex : la place **P3** et **P1**).

On voit bien que le poids de l'arc est égale à deux en amont et deux en aval par contre après la troisième place, il est égale à 1, et à cause de ça l'exécution de la tâche de la MP est effectuée en quatre étapes. Si on considère qu'une seule étape de la MP prend **deux heures** donc la durée totale de la tâche sera de **8 heures** ; cette durée est mieux représentée les figures 4:17 à 4:18.

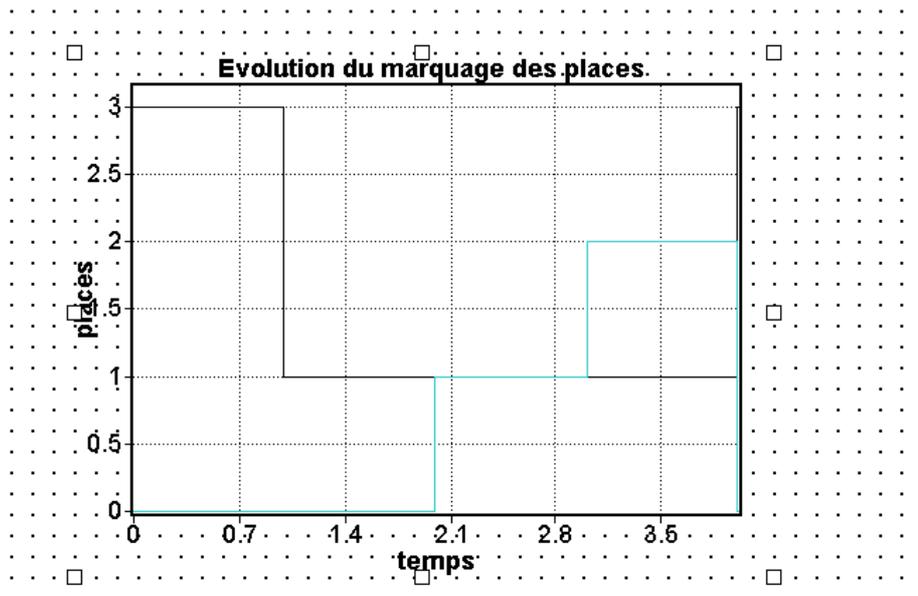
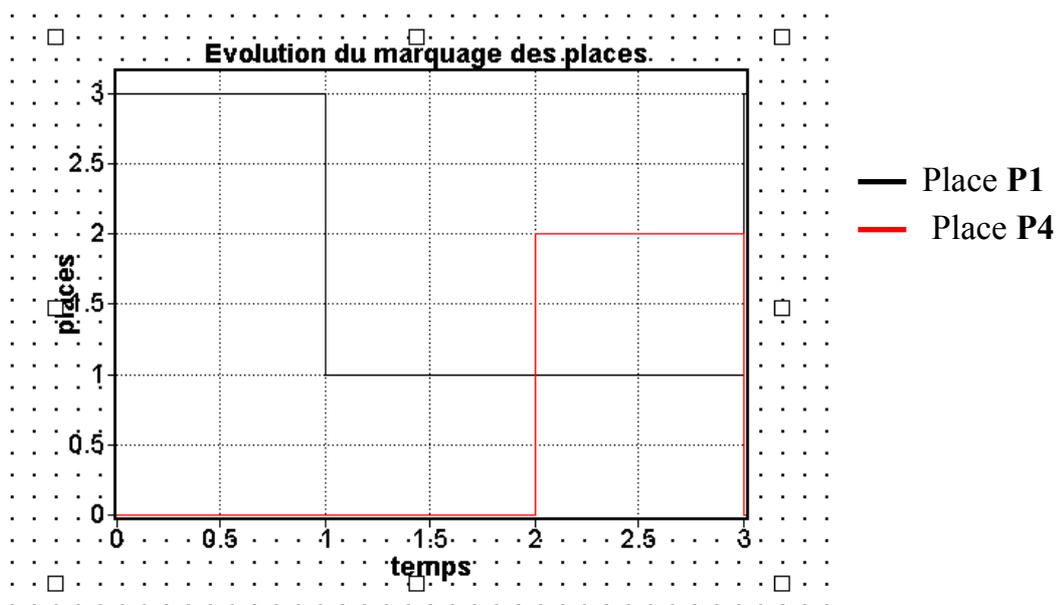


Figure 4.17 L'évolution de marquage en quatre unités de temps et avec utilisation de deux ressources renouvelables

Chaque place dans le modèle de la MP est représentée par un tracé; ces tracés sont définis par la fonction $F(t) = \text{Nombres de jetons dans les places}$.

Optimisation du modèle

Pour minimiser la durée d'exécution on a propose la même valeur du poids (deux) pour tous les arcs ; le schémas de la figure 4.17 montre l'évolution du marquage des places du modèle de la MP qui est effectué en trois unités de temps c'est-à-dire en **6 heures** .



Après la réduction du temps d'exécution de la tâche il nous reste à optimiser la consommation des ressources. Pour les ressources consommables on voit qu'il y a une compatibilité entre le poids de l'arc et le nombre de ressources. Mais pour les ressources renouvelables il faut les consommer totalement et avec un minimum de temps, pour cela on met le poids de l'arc égale à trois dans tous les arcs et les résultats obtenus sont présentés dans la figure 4.19

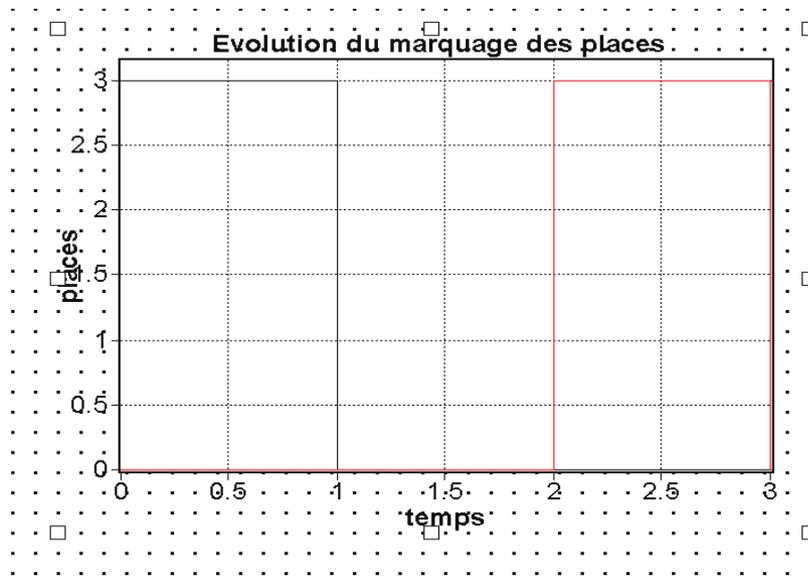


Figure 4.19 L'évolution de marquage en trois unités de temps et avec utilisation complète des ressources

Donc pour optimiser le modèle de la MP il faut trouver la solution d'utiliser toutes les ressources en un temps minimum, cela nous donne un outil agréable pour estimer le temps d'exécution de la tâche de la MP, selon l'utilisation des ressources existantes.

c) Simulation du modèle production/maintenance

Notre souci dans la simulation du modèle production /maintenance est de voir la validité du modèle combinatoire, et d'appliquer les tâches de la maintenance préventive optimisées à la date qui convient selon la périodicité des tâches de la MP.

On prend dans le modèle suivant la tâche de la maintenance préventive appliquer à la première machine (**le tour**).

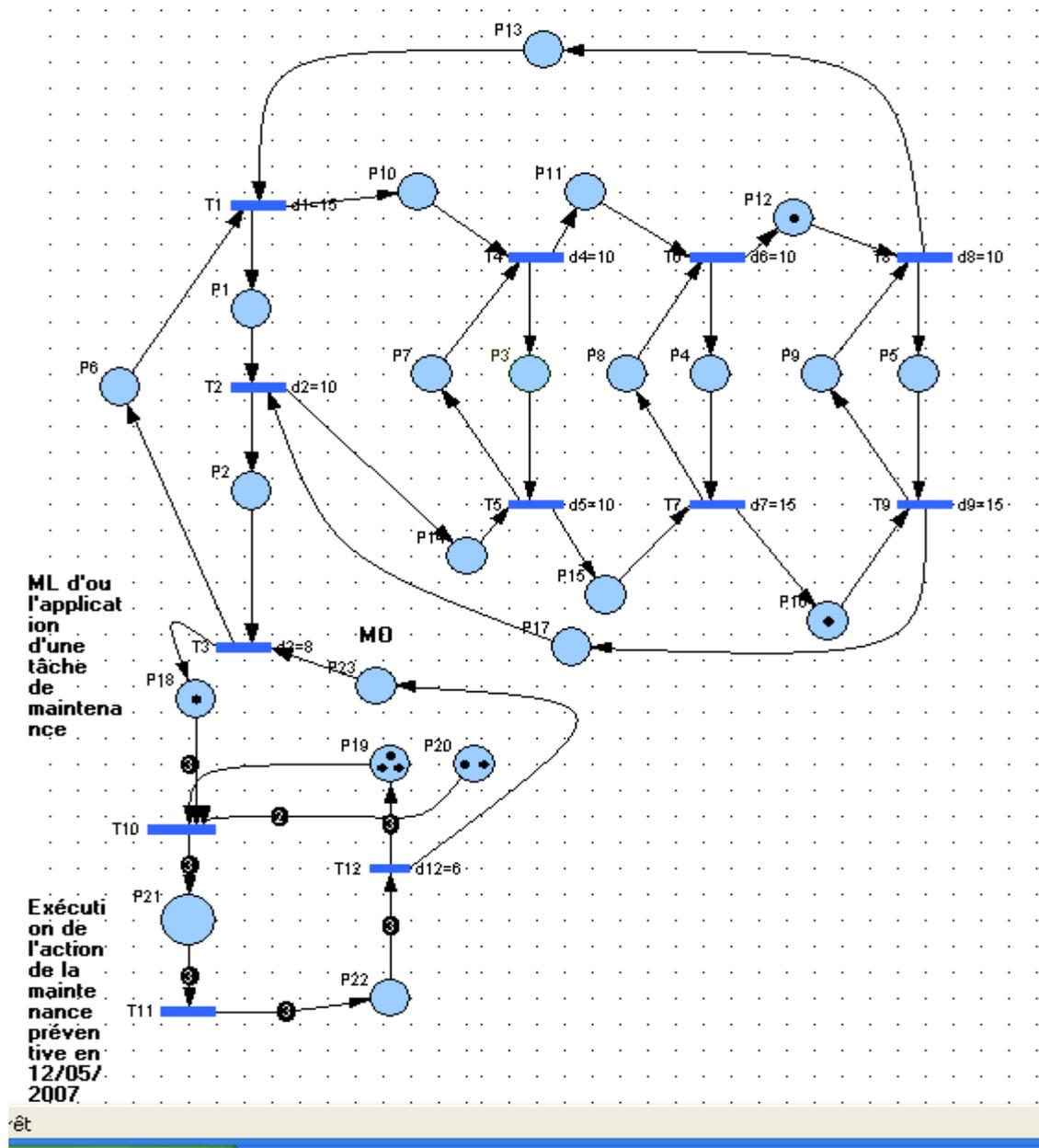


Figure 4.20 Modèle de la production/maintenance conçu avant Simulation

Résultats de la simulation

La simulation s'est faite convenablement et n'a montré aucun conflit ou anomalie et montre une cohérence de débit à la fin de l'intervention.

Quand la transition **T10** est franchie le modèle de la MP commence son déroulement en trois unités de temps et à la fin d'exécution, la transition **T12** est franchie et la machine sera prête pour reprendre le cycle de production. La production recommence lors du franchissement de la transition **T1** et le cycle continue son déroulement.

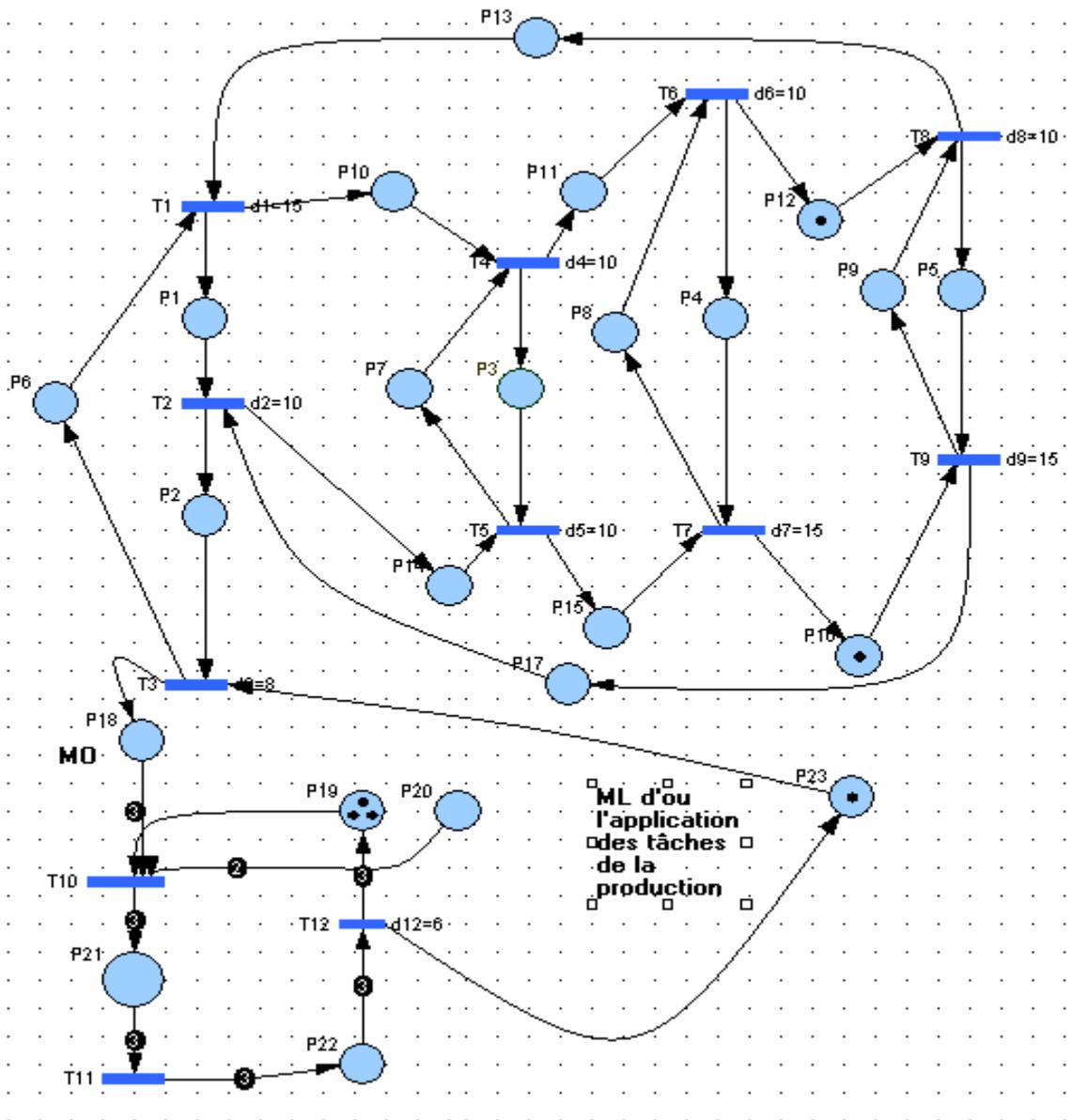


Figure 4.21 Modèle de la production/maintenance amélioré après la simulation

On voit bien le changement du marquage dans le modèle ci-dessus ; le jeton de la place P18 dans la figure 4.20 transféré à la place P23 après la simulation.

L'évolution du nombre de marquage est décrit dans la figure 4.22 on montre seul les places qui décrivent un changement lors de l'exécution de la tâche de la MP ; Pour voir l'évolution du système.

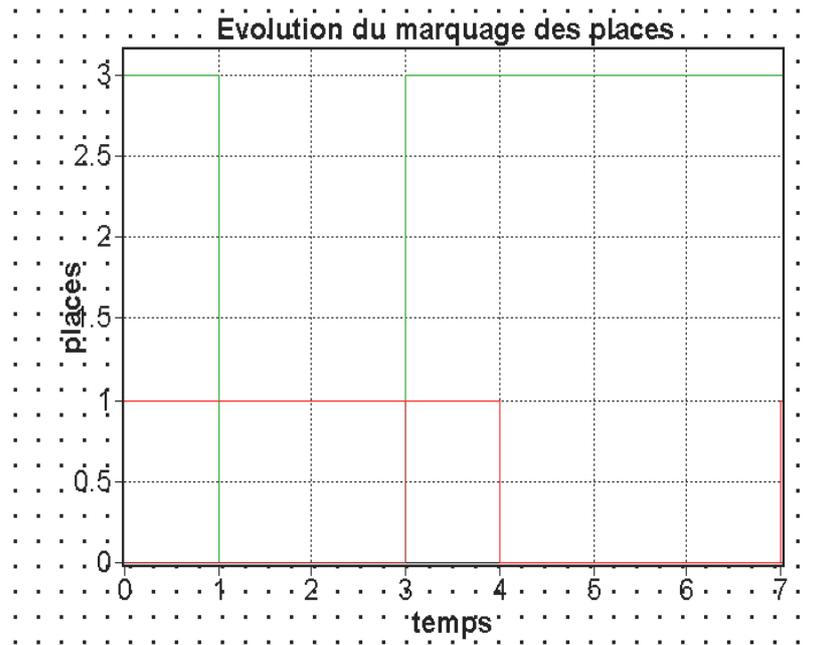


Figure 4.22 Evolution du marquage des places P13, P24, P28 et P6

- La place **P13**
- La place **P24**
- La place **P28**
- La place **P6**

Ce graphe de marquage présente le modèle de la MP qui a été effectué en trois unités de temps et le modèle de la production pour les transitions **T1**, **T2** et **T3** à la reprise de la production qui a été effectué en quatre unités de temps, donc l'ensemble de la durée est de 7 unités de temps.

Pour voir le rôle que joue la MP dans le fonctionnement de l'atelier. On doit calculer les différents indicateurs de fiabilité et de maintenabilité. Pour cela on choisie **8000 heures** comme durée de fonctionnement, notons qu'on effectue les calculs sans effectuer les tâches de la MP aux machines et on les calcul après l'intégration des tâches de la MP qui sont indiquées dans le tableau (IV.3).

D'abord on rassemble les statistiques des pannes de l'atelier pendant la période de fonctionnement (Tableau IV.4), ensuite on passe au calcul des indicateurs.

Tableau IV.4 Statistiques des défaillances

Machine	Tour (M1)	Fraiseuse (M2)	Rectifieuse (M3)
N^{bre} de pannes	6	4	2
Durée des pannes (h)	80	60	25
N^{bre} de pannes après La MP	3	2	1
Durée des pannes (h)	35	20	15

On voit bien dans le tableau IV.4 que les pannes des machines sont réduites de 50% après l'intégration des tâches de la MP systématique dans la même durée de fonctionnement. Donc il nous reste à savoir l'influence de cette réduction sur la productivité de l'atelier, le tableau ci-dessous reflète les résultats de calcul des indicateurs de la fiabilité et de la maintenabilité avant et après l'intégration des tâches de la MP.

Tableau IV.5 Indicateurs de fiabilité et de maintenabilité

Indicateurs		MTBF	λ (10^{-2})	MTTR	μ	Disonibilité
M1	Sans MP	1253,33	0,07	80	0,01	94 %
	Avec MP	2603	0,03	35	0,02	98,67 %
M2	Sans MP	1093,57	0,09	49,28	0,02	95,68 %
	Avec MP	3937	0,02	20	0,05	99,49 %
M3	Sans MP	3975	0,02	25	0,04	99,37 %
	Avec MP	7899	0,01	15	0,06	99,81 %

Discussion des résultats

On voit bien dans les résultats du tableau IV.5 dans la colonne de l' MTBF, ainsi que la disponibilité des machines sont augmentés malgré le temps d'arrêt de la production lors de l'application des tâches de la maintenance préventive systématique (figure 4.23).

Si on applique à chaque machine les quatre tâches de la MP indiqué précédemment, le MTBF (tableau IV.6), sera augmenté trois fois plus, et la disponibilité sera améliorée par rapport au dernier résultat de la figure 4.24, parce que le taux de pannes a diminué de 65%, évidemment la productivité des machines augmente et notre objectif est alors atteint.

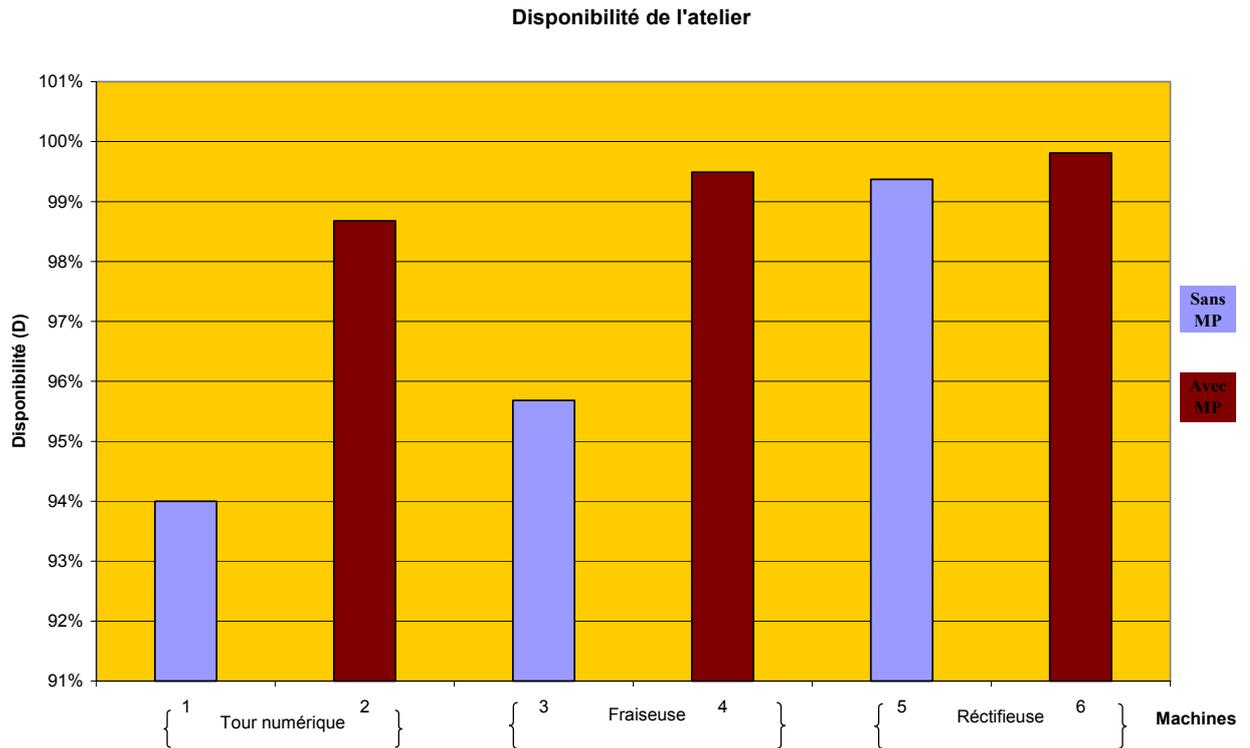


Figure 4.23 Disponibilité de L'atelier de fabrication

TableauIV.6 Indicateurs de fiabilité et de la maintenabilité

Indicateurs		MTBF	$\lambda (10^{-2})$	MTTR	μ	D
M1	Sans MP	1253,33	0,07	80	0,01	94 %
	Avec MP	3803	0,02	25	0,04	99,34 %
M2	Sans MP	1093,57	0,09	49,28	0,02	95,68 %
	Avec MP	7641	0,01	15	0,06	99,8 %
M3	Sans MP	3975	0,02	25	0,04	99,37 %
	Avec MP	7644	0,01	12	0,08	99,84 %

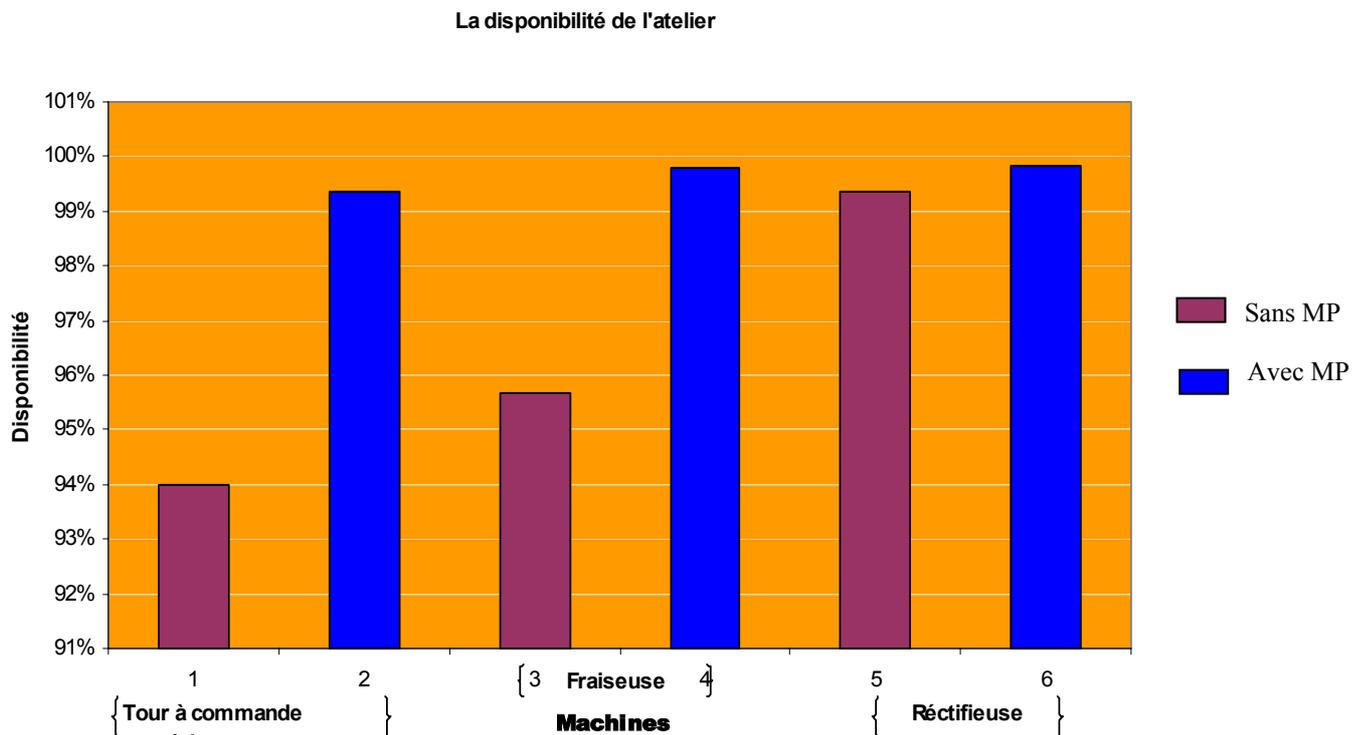


Figure 4.24 Disponibilité du Job-Shop en appliquant quatre tâches de la MP à chaque machine

On voit bien dans le schémas ci-dessus que la disponibilité des machines a augmentée par rapport au schémas précédent, ce qui signifie que le plus important dans la fonction maintenance est de réduire le taux des pannes pour minimiser le temps d'arrêt de la production due aux pannes des machines . Concernant le temps d'arrêt de la production lors de l'application des tâches de la MP, ce temps est négligeable par rapport au temps d'arrêt causé par les pannes ; donc il faut toujours se baser sur l'application d'une politique de maintenance qui minimise les pannes à long termes.

Conclusion

On peut conclure de ce chapitre qui exprime la diversité des RdP pour la modélisation des systèmes de production en utilisant les RdP T-temporisé, la modélisation des tâches de la maintenance préventive est basée sur les RdP temporisés synchronisés généralisés donc grâce à cette diversité on peut modéliser des SdP à grand degrés de complexité, le principe de base développé reste toujours valide.

Cette partie exprime aussi que les RdP sont un outil Fiable qui permettent la modélisation des SdP voir le comportement de l'atelier, dans les différentes situations, les RdP offrent un support graphique et naturel simple pour la représentation, la compréhension et la synchronisation des tâches en connaissant leurs durées, leurs dates d'exécutions et les moyens nécessaire pour les interventions. Ces tâches peuvent être aussi bien ceux de la production ou ceux de la MP.

La modélisation de la maintenance préventive par les RdPTGS a l'avantage, du point de vue pratique, d'autoriser la spécification du comportement d'un système synchronisé sous une forme aisément utilisable par un ingénieur de conception. En autre terme elle permet de réaliser l'évaluation des paramètres quantitatifs désirés, et de résoudre les conflits liés à des partages de ressources et d'estimer le temps opératoires des tâches.

La maintenance préventive apparaît comme la seule politique à même de garantir l'objectif assigné à toute industrie à savoir l'augmentation de la productivité. Par son caractère préventif, elle permet d'atteindre si non d'approcher le « zéro panne ».

La complexité des systèmes de production nous oblige de mettre en pratique ou d'utiliser des logiciels qui facilitent la manipulation de cette modélisation, qu'ils sont basés sur des algorithmes qui nous aident à choisir le type des RdP adaptable à notre modèle et vérifier la validation des modèles et définir les caractéristiques de notre RdP et bien évident qui offrent une simulation adaptée ces choix.

Conclusion Général et Perspectives

Ce modeste travail est orienté pour organiser la gestion et la planification des tâches des systèmes de production et d'optimiser l'ordonnancement d'un atelier pour augmenter le taux de production et minimiser le retard d'intervention pour réaliser les différentes tâches au temps qui convient en tenant compte des moyens et des ressources disponibles dans l'atelier et dans le magasin de stockage.

L'évaluation des performances du système retenu est rendue facile grâce à l'utilisation des logiciels basés sur des algorithmes construits selon les propriétés des RdP comme Le logiciel utilisé "**Sirphyco**".

L'utilisation des réseaux de Petri reste plus large dans le domaine industriel ; on peut les utilisés pour implémenter les systèmes de contrôle en temps réel, qui peuvent gérer les tâches de la production et de la maintenance préventive et qui signale des anomalies en cas ou le système tombe en panne.

De plus, notre modélisation est extensible aux autres politiques de la maintenance par modification et/ou addition de signaux de synchronisation (ex : occurrence d'une panne dans la maintenance corrective).

Donc on peut dire sans aucun doute que les réseaux de Petri est un outil moderne, puissant, flexible et efficace pour modéliser et simuler les systèmes de production quelque soit leurs degrés de complexités, parce que les RdP offrent un support graphique naturel pour les concepteurs, Les conflits et la vérification des modèles peuvent être facilement vérifiés, Les éventuels blocages dans le modèle RdP d'un système peuvent être détectés, Les extensions diverses des réseaux de Petri, comme les RdP temporisés, généralisés, synchronisés et les RdP à objet permettent d'analyser l'utilisation des ressources telles que la défaillance et la productivité et le contrôle, ils fournissent une plate forme structurelle pour effectuer une analyse systématique des systèmes complexes .

BIBLIOGRAPHIE

[**Amod, 01**] Lionel Amodeo, Abdellah el Moudni, Nourredine Zerhouni, "Modélisation et simplification d'un atelier de production d'ailettes", APII-JESA. Vol.35 n^o 5, 2001, pp577-600.

[**Andr, 01**] P. Andre, A. Vailly, " Conception des systèmes d'information ;Panorama des méthodes et des techniques ", Editions Ellipses, janvier 2001,

[**Anis, 04**] Anis Koubaa "Introduction à L'évaluation de performance des systèmes informatiques et de communication "LORIA-TRIO-INPL, Janvier 2004

[**Arti, 97**] Artiba, A. Elmaghraby S.E. "The Planning and Scheduling of production systems, Methodologies and applications" London-Weinhein- CHAPMAN & HALL, 1997, p268.

[**Bend, 03**] Bendada El arbi "Application des réseaux de Petri à la gestion des systèmes de production " mémoire de magistère de l'ex INGM -université de boumerdes-, 2003, pp25,26

[**Benn, 96**] Meziane Bennour "Intégration des opérations de la maintenance dans la production"
DEA : IAP. Laboratoire automatique de Besançon, septembre 1996.

[**Bleu, 00**] J-M. Bleux et J-M.Fenchon " Maintenance, système automatisés de production " NATHAN, janvier 2000, pp322-346.

[**Bram, 83**] G.W.Brams "Réseaux de Petri: théories et pratiques"
Tome 1,2 Edition Masson 1983

[**Brin, 99**] Nicolae Brinzei, George Draghici, Michel Ferney, Nouredine Zerhouni, " Modélisation des systèmes de production par une approche Muti-Agents ", Mecanica, 1999, p7.

[**Chen, 03**] Chen H, Amodeo L and Boudjeloud L., "Supply Chain Optimization with Petri Nets and Genetic Algorithms", International conference on industrial Engineering and Production Management, Porto, vol 2, pp. 49-58, May 26-28, 2003

[**Chre, 83**] Chrétienne P. "Les Réseaux de Petri Temporisés". Thèse d'état, Université Pierre et Marie Curie (Paris 6), Paris, Juin 1983.

[**Feng, 93**] Feng Chu – Jean-Marie Proth – Vanio Marilo Savi "Ordonnancement basé sur les réseaux de Petri" INRIA n^o 1960, Juillet 1993, p20.

[**Cohe, 95**] Guy Coheu, "Théorie algébrique des systèmes à évènements discrets", INRIA 1995, p57.

[Cres, 94] Joël Crestel, Michel Guitton, " Design of control and Simulation Systems an Approach Using a Timed Petri Net Formalization", RAPA. Vol.7 n^o 4, 1994, pp437- 448.

[Davi, 89] René David et Hassane Alla, "Du Grafctet aux Réseaux de Petri", Edition Hermès, Paris, 1989

[Giar, 03] Vincent Giard, "Gestion de production ", Paris Economica, 2003

[Hent, 99] Hentous, H. "Contribution au pilotage des systèmes de production de type Job-Shop ". Thèse de doctorat, INSALYON, 1999,p 149.

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

[Jave, 97] G. Javel, "Organisation et gestion de la production», Paris, Masson 1997, p 401.

[Laft, 91] Saïd Laftit «Graphes d'évènements déterministes et stochastiques : Application au systèmes de production " Thèse de doctorat, Paris IX DAUPHINE, 1991, 171p

[Leml, 01] Tayeb Lemlouma, " Une étude d'approches heuristique pour l'ordonnancement des jobs dans le Flow-Shop ", RIST Vol. 11 n^o 2, 2001.

[Mari, 94] Stéphane Marier, Abderrahman El mhamedi, Zdenek Binder "Modélisation et évaluation d'une mission de téléopération par Réseau de Petri Stochastique Généralisé", RAPA Vol.7 n^o 3. 1994, pp 317-337.

[Mari, 99] Abderraman El Mhamdi, Stéphane Marier, "Modélisation et évaluation des performances des processus semi-structurés de l'entreprise ", APII-JESA. Vol. 33-n^o10, 1999, pp 1153-1183.

[Merl, 76] P.M. Merlin and D.J. Farber. " Recoverability of communication protocols : Implications of a theoretical study" IEEE Transactions on communications 24(9) September 1976, pp 1036-1043.

[Monc, 91] Monchy François, "La fonction maintenance", Paris : Masson 1991

[Mura, 89] T. Murata, "Petri Nets : Properties, Analysis and applications", IEEE, Vol 77, n^o 4, April 1989, pp 541-579.

[Nutt, 73] J.D. Noe and G.J. Nutt., " Macro e-nets representation of parallel systems,".IEEE Transactions on Computers, 31(9): August 1973, pp 718-727.

[Rama, 80] Ramamoorthy C.V. et Hogs. "Performance evaluation of Asynchronous Concurrent Systems Using Petri Nets". IEEE Transaction on Software Engineering, Vol SE-6, n^o 5, 1980, pp 440-449.

[Sass, 98] Chadi Sassine " Intégration des politiques de maintenance dans les systèmes de production"

Thèse : A.P ,INPG, Juillet 1998.

[Savi, 94] V.M.Savi "Conception préliminaire des systèmes de production à l'aide des réseaux de Petri: évaluation des performances" Thèse: Automatique. L'université de Metz, 1994.

[Tech, 06] "Applications des réseaux de Petri " Technique de l'ingénieur 2006, S7542.

[Vale, 00] Robert Valette "les Réseaux de Petri" Support de cours, LAAS-CNRS-Toulouse, 2000.

[Widm, 91] Marino Widmer, "Modèles mathématiques pour une gestion efficace des ateliers flexibles", Romandes, Berne, 1991.

[Zhen, 98] Zhen Liu, "Performance Analysis of Stochastic Timed Petri Nets Using Linear Programming Approach", IEEE transaction of software engineering Vol. 24 n^o 11. November 1998, pp 1014-1030.

Annexe 1

SADT (Structured Analysis and Design Technique) Outil adéquat de modélisation des SdP

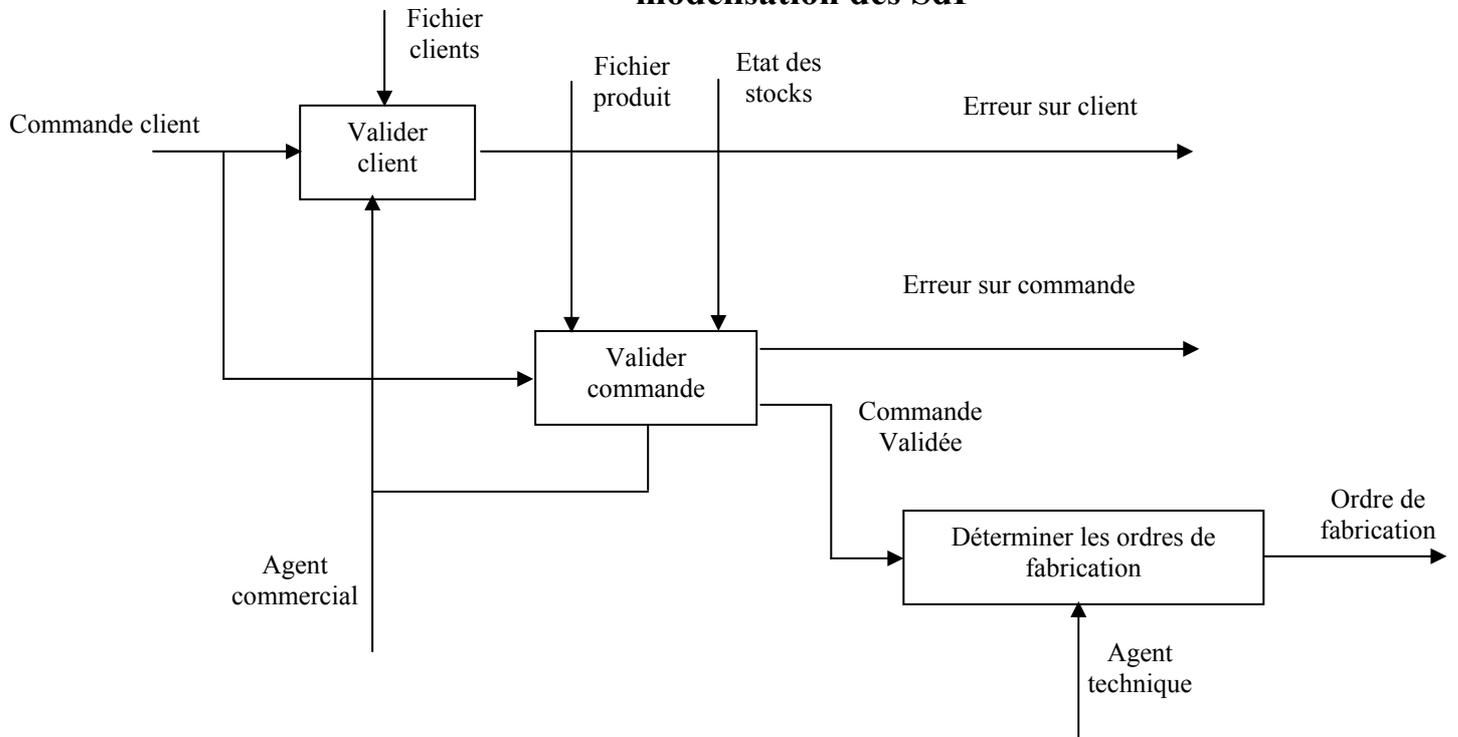


Figure A1.1 : connexions des entrées - sorties.

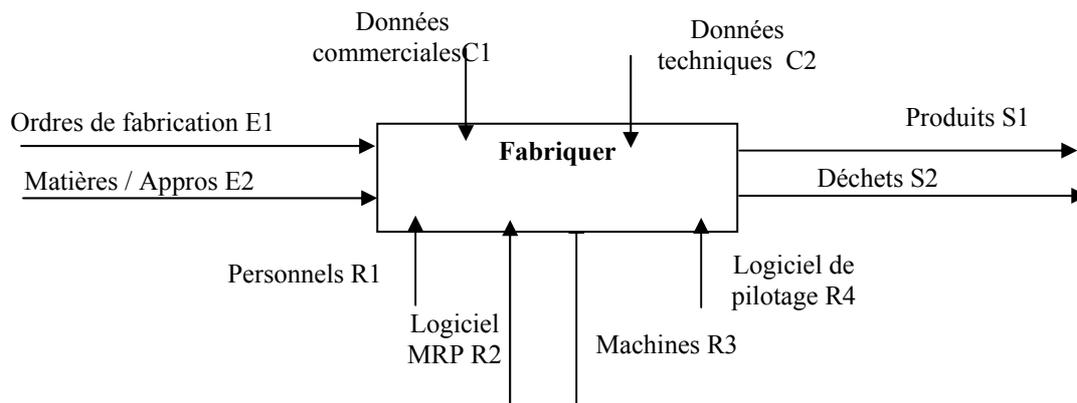


Figure A1.2 : Diagramme A₀ de l'activité fabriquée

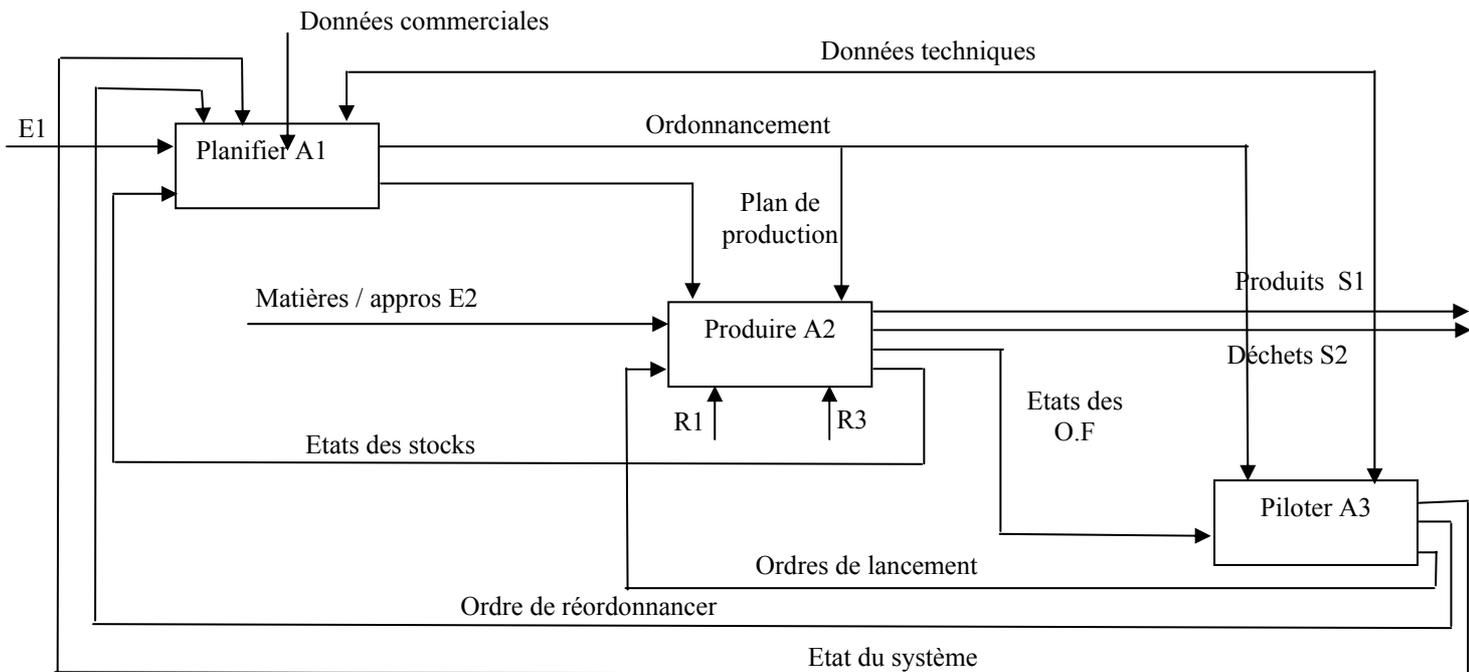


Figure A1.3 : Décomposition fonctionnelle de l'activité.

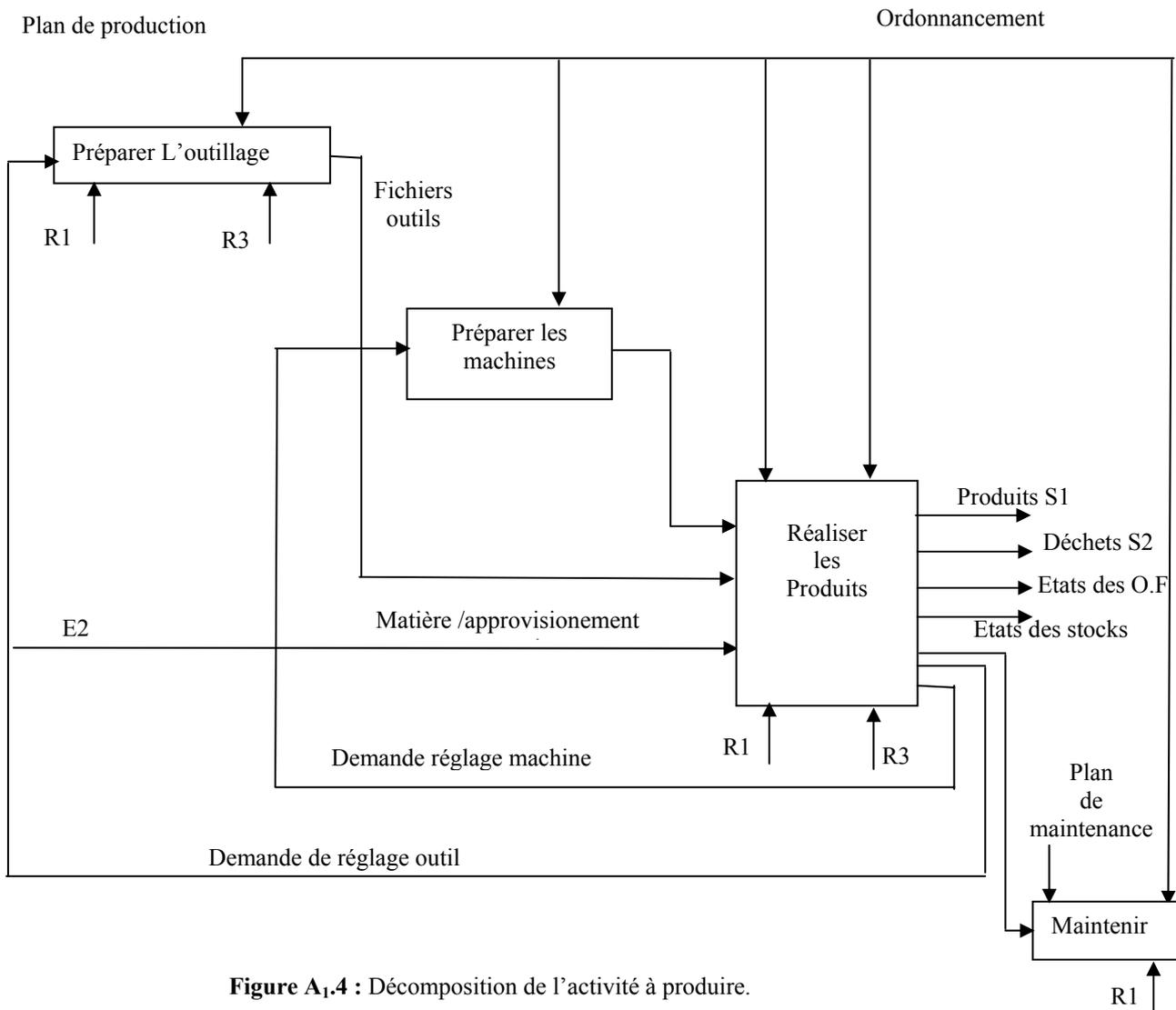


Figure A1.4 : Décomposition de l'activité à produire.

Annexe 2

L'EMPLOI DU LOGICIEL SIRPHYCO

Sirphyco représente un programme qui permet à des utilisateurs de simuler et évaluer le comportement des différents types des réseaux de Petri. Il permet à des utilisateurs d'établir un réseau de Petri d'une façon graphique.

a) Préparation des données d'entrées

Les données d'entrées pour l'algorithme de calcul et le graphique d'évolution sont représentées par le réseau de Petri continu synchronisé et tous ses composants : les vitesses maximales pour des transitions, le marquage initial pour des places et la règle de résolution de chaque conflit. Afin d'avoir les réseaux de Petri Continus synchronisés dont nous avons besoin ainsi que les conditions nécessaires au fonctionnement, l'utilisateur a besoin de spécifier les éléments (Places, transitions ou arcs) il doit choisir le type avant de commencer la représentation de l'élément.

Les places de tout le filet sont continues. L'utilisateur doit choisir parmi le Bouton correspondant aux places (situé au dessus) l'option "**continuient**" ; toutes les places doivent être continues.

L'utilisateur doit choisir parmi le Bouton correspondant aux transitions (également situé au dessus) l'option "**constante maximale de Vitesse**".

Afin d'employer les arcs ordinaires, l'option "**Ordinaire**" doit être choisie. S'il y a un besoin d'arc généralisé l'option "**généralisent**" doit être choisi.

Si l'utilisateur veut tracer un arc, il doit employer le bouton **CTRL** dans le même temps de clique dessus un arc. Des points courbant multiples peuvent être indiqués pour un arc ; double clique sur un élément permet à l'utilisateur de changer des paramètres de cet élément.

S'il y a **des conflits** (plus d'une transition sont alimentées par une place), la règle de résolution doit être donnée (pour chaque place appartenant à un conflit). La règle de résolution peut être basée sur des priorités et/ou le partage.

La règle de résolution peut être donnée "Simulation/Conflits" d'accès de la barre de menu. Si deux transitions sont dans un partage, elles doivent avoir le même niveau prioritaire. Si oui, le poids de partage peut être indiqué.

Afin d'avoir un exemple valide la vitesse maximale pour chaque transition et également le marquage initial pour chaque place doit être donné.

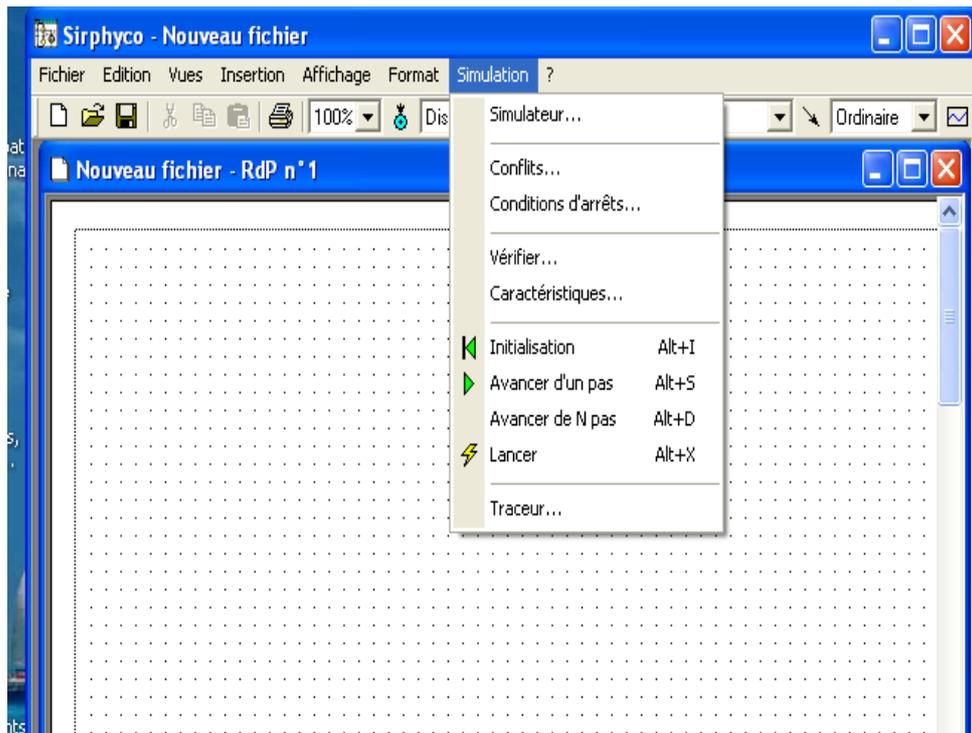


Figure A₂.1 Interface graphique du logiciel

b) Etablir la simulation

Afin d'établir la simulation et obtenir le graphique d'évolution, l'utilisateur doit choisir un simulateur pour synchroniser; Les réseaux de Petri Continus et ensuite on clique au dessus de l'un des boutons suivant (situés également sur le toolbar), ou le premier bouton est utilisé pour **initialiser** le réseau de Petri.

Le second est employé pour regarder le **graphique d'évolution point par point** et le troisième bouton (est employé pour regarder toute l'évolution des réseaux de Petri. Afin de pouvoir voir l'évolution du marquage de la place, il est recommandable pour insérer les graphiques d'évolution (l'un ou l'autre d'"Insertion/Courbes") ou directement du toolbar (entre les types d'arc et le texte). Chaque graphique peut contenir des informations sur un ou plusieurs places.

b) Lecture des résultats

Les résultats sont présentés dans le logiciel **Sirphyco** d'une façon graphique : pour chaque graphe d'état les marquages sont mises à jour et l'évolution du : marquage de la

place est montrée dans le graphique pendant toutes les étapes de fonctionnement de l'atelier (s'il y a un graphique pour cette place) et on peut faire un graphe de l'évolution de marquages de toutes les places de l'atelier et bien sûr pendant toutes les étapes de fonctionnement (**Voir figure A_{2.2}**).

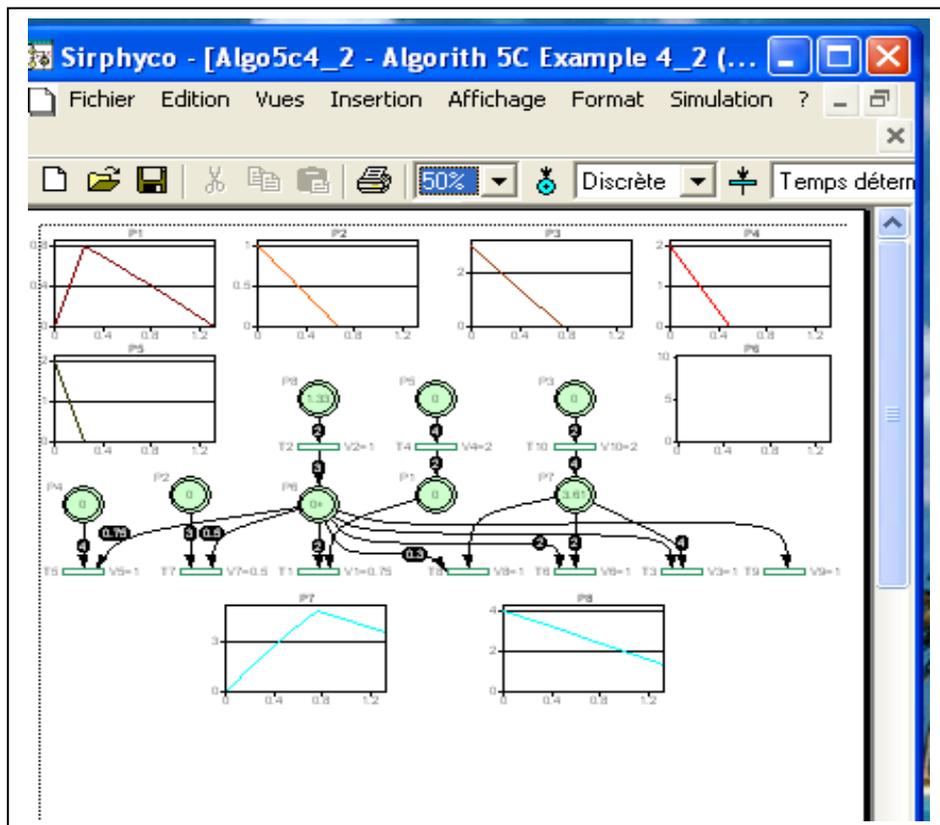


Figure A_{2.2} Exemple de simulation

La figure A_{2.2} présente un exemple de simulation sous le logiciel « Sirphyco ».