

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE  
DEPARTEMENT D'AUTOMATIQUE

## Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER PROFESSIONNEL

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie électrique

Spécialité : **Automatique et informatique  
industrielles**

*Présenté par*

**HAYAT CHELLI  
LYES CHOUGAR**

Thème

# Modélisation et synthèse de superviseur pour une chaîne de production

*Mémoire soutenu publiquement le ...21.../...07.../ 2016..... devant le jury composé de :*

**M Mohend Amziane TOUAT**

Grade, Lieu d'exercice, Président

**M Redouane KARA**

Grade, Lieu d'exercice, Encadreur

**M Mohamed GAOUAOUI**

Grade, Lieu d'exercice, Co-Encadreur

**M Ahmed MAIDI**

Grade, Lieu d'exercice, Examineur

# Remerciements

Arrivé au terme de ce travail, Une pensée pieuse à Dieu qui a éclairé notre chemin et mené vers la concrétisation de ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre gratitude et notre profond respect pour notre promoteur Monsieur Kara Redouane maitre de conférences au département automatique pour son aide et suivi durant l'élaboration de ce travail.

Nous remercions Monsieur Gaouaoui Mohammed et tout le personnel du service maintenance à ANNABIB qui nous a toujours accueillis avec beaucoup de gentillesse et de patience.

Nous remercions également Madame Adjmout et toute les personnes qui nous ont soutenu et encouragé pour aller au bout de ce travail, en particulier nos familles.

Nos derniers remerciements vont aux membres de jury qui nous ferons l'honneur de juger ce travail, d'apporter leurs réflexion et suggestions scientifiques.



# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à*

*A mes chers parents, à qui je doit tout.*

*A Mon cher père*

*qui ma soutenu est qui a su être patient avec moi et c'est grâce à lui que j'arrive aujourd'hui au terme de ce travail.*

*A ma chère mère*

*qui a toujours prier pour moi durant toutes mes études, qui n'a pas cessé de m'encourager, de me soutenir dans les moments les plus difficiles et qui s'est sacrifier pour ma réussite.*

*A mes très cher frères Hakim Samir et sa femme Fadhlila*

*A mes sœurs Karima et son mari Taous et son mari Yasmine, Sarah*

*A mes neveux et nièces*

*A mon très cher mari Yazid et toute ma belle famille*

*A ma tante Lyliha que j'adore*

*A mes amis*

*Hadia, Ali, Mouhamed, Lysa, Malik, ouiza, Lyes, Hamza, louiza, Merzak, Koussaila, Lynda et Massi ghanou, youcef, Salem, avec qui j'ai partagé tous les moments de joie et a qui je souhaite le succès, et la réussite.*

*A toute la promotion d'automatique professionnelle 2016*

*A vous tous un grand merci.*

*Hayet*



# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à*

*A mes chers parents, à qui je dois tout.*

*A Mon cher père*

*qui ma soutenu est qui a su être patient avec moi est c'est  
grâce à lui que j'arrive aujourd'hui au  
terme de ce travail.*

*A ma chère mère*

*qui à toujours prier pour moi durant toutes mes études, qui n'a pas cesse  
de m'encourager, de me soutenir dans les moments les plus  
difficiles et qui s'est sacrifier pour ma réussite.*

*A mes très chers frères*

*A mes très chères sœurs*

*A mes amis*

*Hayet , amar, amar ,Mahfoudh,Lysa, Malek,Hadia, Lydia, Merzak, Koussaila, Lynda et Massi ,  
aziz ,fetta, soufiane,samira avec qui j'ai partagé tous les moments de joie et a qui je souhaite  
succès, et la réussite.*

*A toute la promotion d'automatique professionnelle 2016*

*A vous tous un grand merci.*

*Lyes*



# SOMMAIRE

---

Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I : Généralité sur les réseaux de Petri</b>	
I. Introduction .....	2
II. Les réseaux de Petri .....	2
II.1. Définition .....	2
II.2. Place transition .....	2
II.3. Le marquage .....	2
II.4. Franchissement d'une transition .....	4
II.5. Séquence de franchissement .....	5
III. Quelques réseaux de Petri particuliers .....	5
III.1. Graphe d'états .....	6
III.2. Graphe d'événement .....	6
III.3. RdP sans conflit .....	6
III.4. RdP à choix libre .....	7
III.5. RdP simple .....	7
III.6. Rdp généralisé .....	7
III.7. RdP à capacité .....	8
III.8. Un réseau de Petri autonome et non autonome .....	8
III.8.1. Réseau de Pétri synchronisé .....	9
III.8.2. Réseau de Petri temporisé .....	12
IV. Les principales propriétés des RdP .....	15
IV.1. Réseau de pétri borné .....	15
IV.2. Réseau vivant .....	16
IV.3. RdP quasi vivant .....	16
IV.4. État d'accueil .....	17
IV.5. Les invariants .....	17
V. Méthodes d'analyse de réseau de Petri .....	19
V.1. Graphe des marquages et arborescence de couverture .....	19
V.2. Matrice d'incidence et équation d'état .....	21
V.3. Les invariants .....	24
VI. Conclusion .....	25

# SOMMAIRE

---

## Chapitre II : Description de la chaîne de production des tubes métalliques

I. Introduction.....	26
II. Description et rôle de la chaîne de production .....	26
II.1. Le rôle de la chaîne de production .....	26
II.2. Description du processus .....	27
III. Synoptique générale de la chaîne .....	27
III.1. Premier hall .....	27
III.2. Deuxième hall .....	28
III.3. Troisième hall .....	28
III.4. Le hall 4 .....	29
IV. composition et rôle de chaque élément.....	29
IV.1. La machine SP1200 .....	29
IV.2. La machine N-L-A-T .....	30
IV.3. La machine chanfreineuse .....	30
IV.4. Machine de test hydrostatique.....	31
IV.5. La machine test ultrason .....	32
IV.6. La radio scopie.....	33
IV.7. Les cabines RX .....	33
IV.8. Tables de stockages et contrôles .....	34
V. problèmes rencontrés .....	34
VI. Conclusion .....	35

## Chapitre III : Synthèse de superviseur en présence de transitions non contrôlables

I. Introduction.....	39
II. Concept de superviseur .....	39
II.1. Principe de la supervision .....	39
II.2. Définition d'un superviseur .....	40
III .Notion de contrôlabilité .....	40
III.1. Evénements contrôlables et événements non contrôlables .....	40
III.2. Condition de contrôlabilité .....	40
IV. Synthèse de superviseur basé sur les RdP .....	41
IV.1. Méthode de commande basée sur les invariants de marquage.....	41
IV.2. Principe des invariants de places (P-invariants) .....	41
IV.3. Description de la méthode.....	42

# SOMMAIRE

---

IV.4. Supervision en présence de transitions incontrôlables .....	45
V. Conclusion.....	47
<b>Chapitre IV : Application de superviseur sur un système de production « ANABIB »</b>	
I. Introduction.....	48
II. Modélisation de l'atelier par RdP .....	48
II.1. Synoptique générale de l'atelier.....	48
II.2. Réseau de Petri modélisant l'atelier .....	48
II.3. Explication des différentes places et transition de notre modèle .....	51
III. Les spécifications (les contraintes) .....	52
III.1. Les différentes contraintes imposées pour notre procédé (système) .....	52
IV. Calcul de superviseur [Bessam KATTEN] .....	53
V. Le modèle RdP globale supervisé de notre atelier .....	59
VI. Conclusion .....	61
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>62</b>

---

## Liste des figures

Figure I.1 : Une place contient un nombre $\geq 0$ de jetons. ....	3
Figure I.2 : Un réseau de Petri avec le marquage initial .....	3
Figure I.3 : signification d'un jeton dans une place .....	4
Figure I. 4 : Franchissement d'une transition .....	4
Figure I.5 : Un RdP marqué .....	5
Figure I. 6.a : RdP sans conflit .....	6
Figure I.6.b : RdP avec conflit .....	6
Figure I.7 : RdP à choix libre .....	7
Figure I.8:RdP simple .....	7
Figure I.9: un RdP à capacité .....	8
Figure I.10.a : Un RdP autonome .....	9
Figure I.10.b : Un RdP non autonome .....	9
Figure I.11 : synchronisation par rendez-vous .....	10
Figure I.12: synchronisation sémaphore .....	11
Figure I.13 : partage des ressources .....	12
Figure I.14: le temps est associé à la place .....	13
Figure I.15: disponibilité du jeton .....	13
Figure I.16: le temps est associé à la transition .....	14
Figure I.17: Réserve d'une marque .....	14
Figure I.18 : RdP non borné .....	15
Figure I.19: un RdP avec une transition quasi vivante .....	16
Figure I. 20: RdP quasi vivant .....	17
Figure I. 21 : Les composantes conservatives .....	18
Figure I. 22 : composante répétitive .....	18
Figure I. 23 : RdP avec son marquage initial .....	19
Figure I.24 : Le graphe des marquages .....	20
Figure I.25 : RdP avec son marquage initial .....	21
Figure I. 26: Arbre de couverture .....	21
Figure I.27 : un RdP marqué .....	22
Figure II.1 : L'entreprise ANABIB .....	26
Figure II.2 : composition de hall (4) .....	29

---

---

Figure II.3 : Machine de fabrication des tubes métalliques soudés en spirale.....	29
Figure II.4 : La machine chanfrein (lameuse) .....	30
Figure II.5 : la machine test hydrostatique .....	31
Figure II.6 : la machine ultrason .....	32
Figure II.7 : principe de contrôle par ultrason .....	32
Figure II.8 : sortie de la cabine RX .....	33
Figure II.8 : Exemple d'une table de stockage.....	34
Figure III.1 : Structure de supervision (système en boucle fermée : S/G) .....	39
Figure III.2 : Réseau de système à superviser.....	43
Figure III.3 : Réseau de système supervisé .....	44
Figure III.4: Matrice d'incidence $W_{RC}$ et les ensembles de sous matrices .....	45
Figure III.5 : Réseau de pétri avec transitions non contrôlables .....	46
Figure III.6 : Étapes de l'algorithme de transformation de la contrainte $m(p_3) \leq 1$ . .....	46
Figure III.7 : Réseau en boucle fermée. ....	47
Figure IV.1 : .....	49
Figure IV.2 : .....	50
Figure IV.3 : calcul du superviseur pour la première contrainte .....	53
Figure IV.4 : Le système supervisé .....	54
Figure IV.5 : le système avec une place de contrôle .....	54
Figure IV.6 : le système supervisé .....	55
Figure IV.7 : le système avec une place de contrôle .....	55
Figure IV.8 : Le système supervisé .....	56
Figure IV.9 : le système avec une place de contrôle .....	56
Figure IV.10 : Le système contrôlé .....	57
Figure IV.11 : le système avec une place de contrôle .....	57
Figure IV.12 : Le système contrôlé .....	58
Figure IV.13 : le système avec une place de contrôle .....	58
Figure IV.14 : Le système avec une place de c contrôle .....	59
Figure IV.15: Le système supervisé .....	59

---

---

---

# Introduction générale

---

Une chaîne de production dans un milieu industriel se compose de machines et de convoyeurs interposés dans un certain ordre afin de réaliser un objectif attendu. Pour analyser, commander et optimiser un processus industriel il est impératif de disposer d'un modèle qui permet de refléter le comportement de celui-ci. Parmi les outils utilisés pour la modélisation, l'analyse et la commande des systèmes de production on cite : les Réseaux de Petri (Murata, 1989), le GRAFCET (Dadid et Alla), les automates à états et les chaînes de Markov. Chaque outil est utilisé pour aborder un problème particulier.

Ce travail rentre dans le cadre d'un stage effectué au sein de la société ANABIB de Rouiba. Précisément, l'objectif était l'étude d'un problème rencontré dans la chaîne de production de tubes métalliques. Il s'agit d'un problème d'encombrement au niveau des stocks intermédiaires.

L'objectif de ce mémoire est dans un premier temps, de proposer un modèle réseau de Petri de la chaîne de production des tubes métalliques. Par la suite, on proposera une méthodologie de synthèse de superviseur basée sur la méthode des invariant de marquages (Yamalidou et al, 1996) qui permettra de résoudre ce problème. Les superviseurs synthétisés s'expriment en termes de places de contrôle et permettent de satisfaire les spécifications imposées à la chaîne de production. Il est à noter que les superviseurs calculés peuvent être mise en œuvre pratiquement dans un API.

Pour mener à terme notre travail, nous avons organisé notre mémoire de la façon suivante :

Dans le premier chapitre nous avons présenté les éléments de base qui permettent de comprendre le formalisme des réseaux de Petri.

Le deuxième chapitre est consacré à la description du système de production des tubes métalliques d'ANABIB. Dans ce chapitre on a aussi posé la problématique rencontrée dans ce projet.

Dans le chapitre trois nous avons présenté quelques méthodes qui permettent de synthétiser des superviseurs pour les systèmes à événements discrets. La théorie de la supervision des SED proposée par Ramadge & Wonham est d'abord présentée en détail, elle est l'origine de la commande par supervision. Puis deux méthodes de synthèse de superviseur sont décrites. La première combine l'approche de Ramadge & Wonham, et la deuxième exploite les invariants de marquage de réseaux de Petri pour synthétiser le système de commande.

En fin, dans le quatrième chapitre nous avons proposé un modèle RdP pour notre système. Ensuite on a proposé une loi de commande pour satisfaire les spécifications imposées sur le marquage des places modélisant les stocks qui posent problème. A la fin de ce chapitre, on a obtenu le modèle globale supervisé.

On termine ce mémoire par une conclusion générale et des perspectives.

## I. Introduction

Historiquement, le formalisme de réseau de Petri a été développé pour la première fois par Carl Adam Petri, un mathématicien Allemand. Ce formalisme date de 1962. L'auteur a défini un outil graphique et mathématique permettant de décrire les relations existant entre des conditions et des événements. Ils permettent de modéliser le comportement de systèmes à événements discrets et de capturer divers phénomènes qui les caractérisent à savoir le parallélisme, la synchronisation, le partage de ressources, la concurrence, etc. Il est à l'origine du Grafcet (ce dernier étant spécialisé dans la description de la commande de systèmes automatisés).

En revanche, la littérature sur les réseaux de Petri est fort riche et comprend de nombreux résultats théoriques et pratiques. Ils constituent un support à la fois graphique et mathématique performant aussi bien pour l'analyse et l'évaluation analytique que pour la simulation du système étudié. Ils sont d'une aide précieuse pour le concepteur dans les différentes phases d'analyse.

Les principaux utilisateurs de ces réseaux sont les informaticiens et les automaticiens. Cependant, l'outil est suffisamment général pour modéliser des phénomènes de nature très variées.

## II. Les réseaux de Petri

**II.1. Définition** : un réseau de Petri (RdP) est un graph biparti orienté, composé de places et transitions reliées par des arcs.

### II.2. Place transition

Un réseau de Petri est composé de deux types nœuds : Un nombre fini non nul de places et un nombre fini non nul de transitions.

- ✓ Un ensemble fini de places,  $P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_m\}$ , symbolisées par des cercles et représentant des **conditions** ou l'état des ressources du système (machine libre, stock vide, convoyeur à l'arrêt, ...).
- ✓ Un ensemble fini de transitions,  $T = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_n\}$ , symbolisées par des tirets et représentant l'ensemble des **événements** (les actions se déroulant dans le système) dont l'occurrence provoque la modification de l'état du système :
- ✓ Un ensemble fini d'arcs orientés qui assurent la liaison d'une place vers une transition ou d'une transition vers une place[1].

### II.3. Le marquage

Le **marquage** d'un RdP est précisé par la présence à l'intérieur des places d'un nombre fini (positif ou nul), de marques ou de jetons. Une place est donc vide ou marquée.

Lorsque la place représente une condition logique (ex: machine à l'arrêt, convoyeur en panne), la présence d'un jeton indique que cette condition est vraie; fausse dans le cas contraire.

Une place donc peut représenter une ressource du système (un stock par exemple), elle peut contenir plusieurs jetons (dans l'exemple du stock, le nombre de jetons peut indiquer le nombre de pièces stockés) [1].

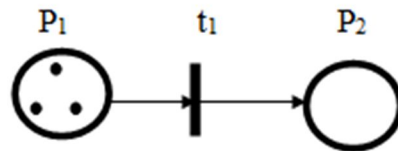


Figure I.1 : Une place contient un nombre  $\geq 0$  de jetons.

Au cours de l'évolution du système, le marquage est susceptible d'être modifié (voir les règles d'évolution d'un RdP). Le **marquage initial**,  $M_0$ , d'un RdP correspond à la distribution initiale des jetons dans chacune des places du RdP, qui précise l'état initial du système. Dans ce cas, on parle du **RdP Marqué** par opposition à un **RdP non marqué**, c'est-à-dire pour lequel le marquage initial n'est pas précisé [1].

On note  $M(P)$  le nombre de jetons contenu dans la place  $P$  pour le marquage  $M$ . Dans l'exemple ci-dessous, si l'état initial correspond à la répartition des jetons suivante, alors le marquage initial:  $M_0 = [M_0(P_1), M_0(P_2)] = [3, 0]$ .

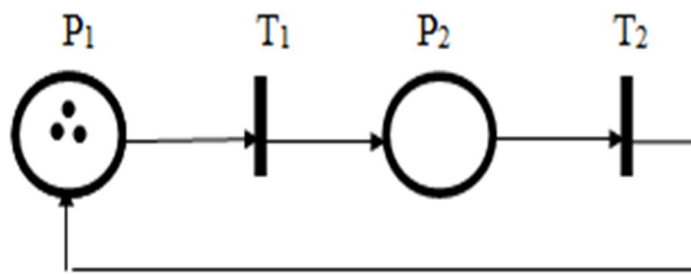


Figure I.2 : Un réseau de Petri avec le marquage initial

Un marquage peut être représenté sous forme d'un vecteur colonne.

$$M_0 = [M_0(P_1), M_0(P_2)]^T = \begin{bmatrix} 3 \\ 0 \end{bmatrix}$$

### Remarque

Un jeton peut avoir plusieurs significations en fonction de la place dans lequel il se trouve. Par exemple dans le RdP ci-dessous on considère que :

- $P_1$  représente un stock : le nombre de jetons en  $P_1$  indique le nombre de pièces stockées

- $P_2$  représente une machine en cours de traitement : un jeton en  $P_2$  indique que la machine traite une pièce
- $P_3$  représente une machine libre : un jeton en  $P_3$  indique que la machine est libre.

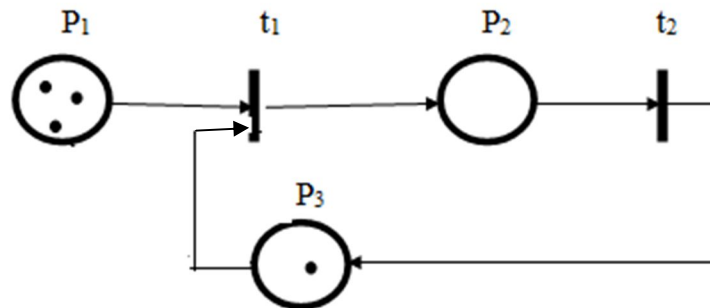


Figure I.3 : signification d'un jeton dans une place

#### II.4. Franchissement d'une transition

Le franchissement d'une transition ne peut s'effectuer que si chacune des places en amont de cette transition contient au moins une marque.

On dit alors que la transition est franchissable, ou validée. Une transition avec un nombre nul de places d'entrées est toujours validée, cette dernière appelée transition source.

Le franchissement d'une transition  $T_j$  consiste à retirer une marque dans chacune des places en amont de la transition  $T_j$  et ajoute une marque dans chacune des places en aval de la transition  $T_j$  [1].

#### Exemple

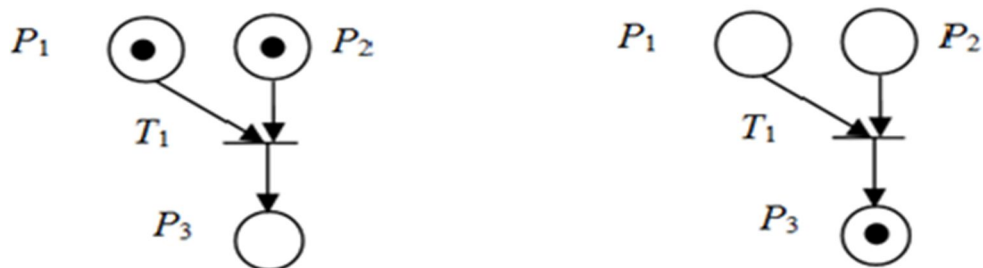
a- Avant franchissement de  $T_1$ b- après franchissement de  $T_1$ 

Figure I. 4 : Franchissement d'une transition

## II.5. Séquence de franchissement

Le marquage d'un RdP à un certain instant est un vecteur colonne dont l' $i$ ème composante est le marquage de la place  $P_i$  à cet instant. Pour faciliter l'écriture dans le texte nous écrivons les marquages sous la forme transposée. Nous utiliserons des crochets pour représenter une matrice et des parenthèses pour représenter la forme transposée [1].

### Exemple

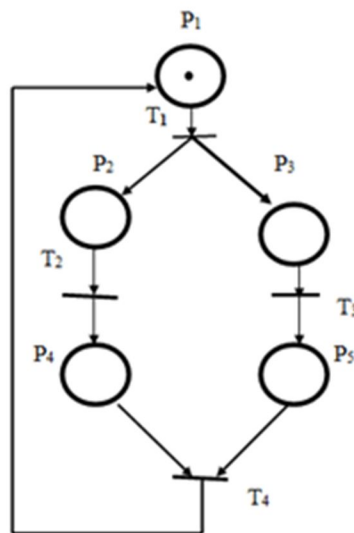


Figure I.5 : Un RdP marqué

$$M_0 = (1, 0, 0, 0, 0) = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Pour le marquage  $M_0$ , il y a une transition validée qui est  $T_1$ . Le franchissement de la transition  $T_1$  à partir de  $M_0$  conduit au marquage  $M_1 = (0, 1, 1, 0, 0)$ . à partir de ce marquage on peut franchir  $T_2$ , ce qui conduit au marquage  $M_2$ .  $T_1$  suivie de  $T_2$  est écrite :  $T_1 T_2$  est correspond à une séquence, on peut écrire :

$$S = T_1 T_2$$

$$\text{Et } M_0[S] > M_2$$

A chaque séquence de franchissement, est associé un vecteur caractéristique noté  $\bar{s}$ . C'est un vecteur de dimension  $n$  (nombre de transitions) où le composant numéro  $j$  correspond au nombre de franchissements de la transition  $T_j$  dans la séquence  $S$ .

## III. Quelques réseaux de Petri particuliers

Certains **RdP** ont des **structures particuliers** c'est-à-dire qu'ils possèdent des caractéristiques et des propriétés que n'ont pas les réseaux dans le cas le plus générale.

### III.1. Graphe d'états

Un RdP est un graphe d'états si et seulement si chaque transition possède exactement une place d'entrée et une place de sortie [1].



### III.2. Graphe d'événement

Un RdP est un graphe d'événement si et seulement si chaque place a exactement une transition d'entrée et une transition de sortie. Un graphe d'événement est le dual d'un graphe d'états.

### III.3. RdP sans conflit

Un réseau de Petri est dit sans conflit si et seulement si toute place a au plus une transition de sortie.

Un RdP avec conflit est un réseau qui possède donc une place avec au moins deux transitions de sorties,  $T_1$ ,  $T_2$ . Cette situation de conflit correspond à la concurrence à la consommation des jetons de cette place [1].

#### Exemple

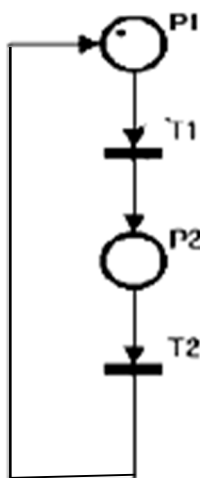


Figure I. 6.a : RdP sans conflit

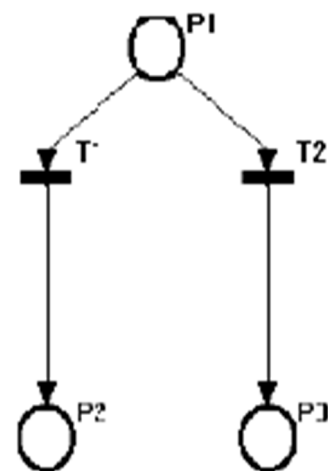


Figure I.6.b :RdP avec conflit

### III.4. RdP a choix libre

Un RdP à choix libre est un RdP dans lequel pour tout conflit  $\langle P_1, \{T_1, T_2, \dots\} \rangle$  aucune des transitions  $T_1, T_2, \dots$  ne possède une autre place d'entrée que  $P_1$ .

Un RdP à choix étendu est tel que pour tout conflit  $\langle P_1, \{T_1, T_2, \dots\} \rangle$  toutes les transitions  $T_1, T_2, \dots$  ont le même ensemble de places d'entrée. C'est -à-dire a pour places d'entrées  $P_1$  et  $P_2$ , etc.

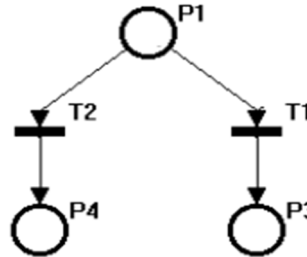


Figure I.7 :RdP à choix libre

### III.5. RdP simple

C'est un RdP dans lequel chaque transition ne peut pas être concernée que par un conflit au plus. Autrement dit, s'il existe une transition  $T_1$  et deux conflits  $\langle P_1, \{T_1, T_2, \dots\} \rangle$  et  $\langle P_2, \{T_1, T_3, \dots\} \rangle$ , alors le réseau de Petri n'est pas simple.

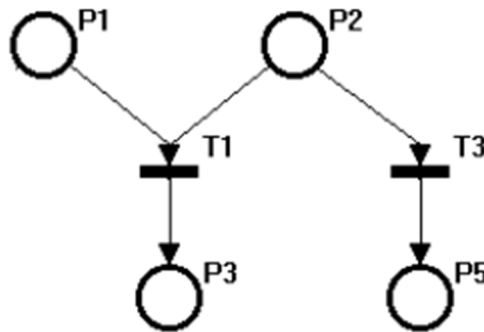


Figure I.8:RdP simple

### III.6. RdP généralisé

Le franchissement d'une transition validée consiste à enlever un jeton de toutes les places d'entrée de la transition et à en déposer un dans toutes les places de sortie de cette même transition. Ceci implique que les arcs orientés reliant les places (d'entrée et de sortie) aux transitions ont par défaut une valuation ou un poids d'une unité. Ce sont les RdP ordinaires.

De manière plus générale la valuation ou le poids des arcs d'un RdP peut être supérieure à 1. Dans ce cas les RdP sont dits généralisés. Chaque arc porte le nombre de jetons qui le traverse lors d'un tir de transition.

Tout RdP généralisé peut être transformé en RdP ordinaire. Cette transformation qui ne présente pas d'intérêt particulier pour l'analyse par les RdP est uniquement donnée pour

illustrer l'équivalence entre RdP généralisé et RdP ordinaire. Par ailleurs, l'exemple présenté est relativement simple mais cette transformation peut conduire à des RdP ordinaires très complexes.

Dans le RdP généralisé l'arc  $T1 \rightarrow P1$  a un poids de 2. Dans le RdP ordinaire équivalent, la transition  $T1$  est remplacée par le "sous-réseau" constitué de  $T1$ ,  $P4$ ,  $T'1$ . Pour le marquage indiqué, seule la transition  $T'1$  est validée. Le franchissement de  $T1$ , enlève un jeton de  $P2$ , de  $P3$  et de  $P4$  et en dépose un dans  $P1$  et dans  $P'4$ . Pour ce nouveau marquage seule  $T'1$  est franchissable. Son franchissement dépose alors un deuxième jeton dans  $P1$ . Le marquage est alors identique à celui qu'atteindrai le RdP généralisé par le franchissement de  $T1$ . Le rôle de la place  $P4$  est de permettre le franchissement en séquence des transitions  $T'1$  et  $T''1$  avant le franchissement de  $T2$  [2].

### III.7. RdP à capacité

Dans un RdP ordinaire (ou généralisé) il n'y a aucune limitation quant au nombre de jetons pouvant être déposé dans une place. Un RdP à capacités est un RdP dans lequel des capacités (nombres entiers strictement positifs) sont associées aux places. Le franchissement d'une transition d'entrée d'une place  $P_i$  dont la capacité est  $cap(P_i)$  n'est possible que si le franchissement ne conduit pas à un nombre de jetons dans  $P_i$  qui est plus grand que  $Cap(P_i)$  [2].

#### Exemple

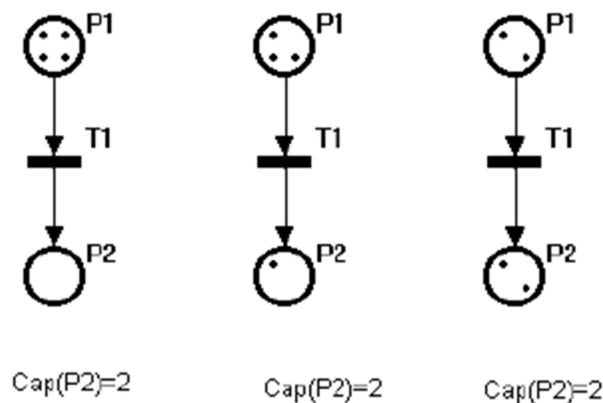


Figure I.9: un RdP à capacité

### III.8. Un réseau de Petri autonome et non autonome

- Un **RdP autonome** décrit le fonctionnement d'un système dont le franchissement des transitions ne dépend pas d'événements extérieurs au système.

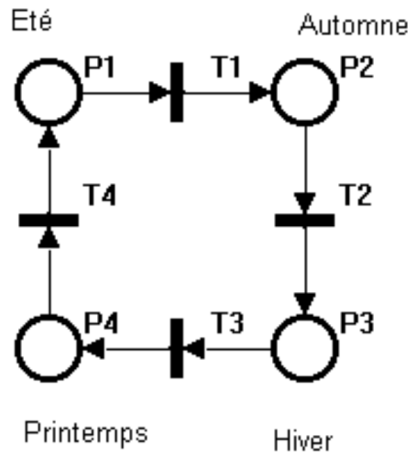


Figure I.10.a : Un RdP autonome

Ce RdP **est autonome** : le moment de passage d'une saison à une autre n'est pas indiqué.

- Un RdP **non autonome** décrit le fonctionnement d'un système dont l'évolution est conditionnée par des événements externes ou par le temps. Un RdP non autonome est synchronisé et/ou temporisé [2]

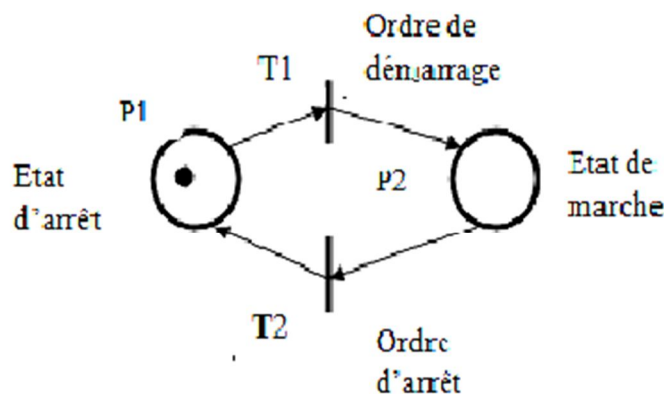


Figure I.10.b : Un RdP non autonome

### III.8.1. Réseau de Pétri synchronisé

#### ➤ Synchronisation mutuelle (par rendez-vous)

La synchronisation mutuelle ou rendez-vous permet de synchroniser les opérations de deux processus (ou plusieurs). Dans l'exemple ci-dessus, le franchissement de la transition T3 ne peut se faire que si la place P1 du processus 1 et la place P2 du processus 2 contiennent chacun au moins un jeton. Si ce n'est pas le cas, par exemple la place P2 ne contient pas de jeton, et la place P1 contient un jeton, le processus 1 est "bloqué" sur la place P1 : il attend que l'évolution du processus 2 soit telle qu'au moins un jeton apparaisse dans la place P2 [2].

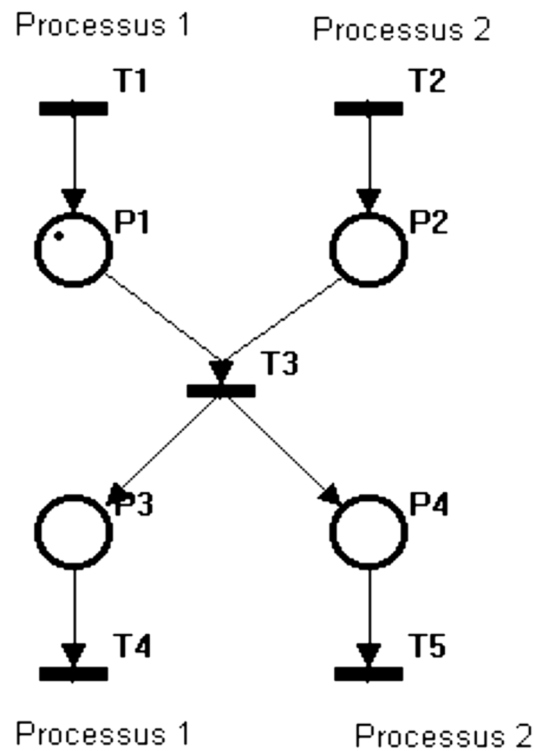


Figure I.11 : synchronisation par rendez-vous

### ➤ Synchronisation (sémaphore)

Les opérations d'un processus ne peuvent se poursuivre que si un processus a atteint un certain niveau dans la suite de ses opérations.

Par contre, l'avancement des opérations du premier processus ne dépend pas de l'avancement des opérations du second processus. Pour l'exemple ci-contre, le processus 2 ne peut franchir la transition T4 que si la place P0 contient au moins un jeton. Un jeton est ajouté dans la place P0 lorsque l'évolution du processus 1 amène le franchissement de la transition T1. L'évolution du processus 2 va donc dépendre de l'évolution du processus [2].

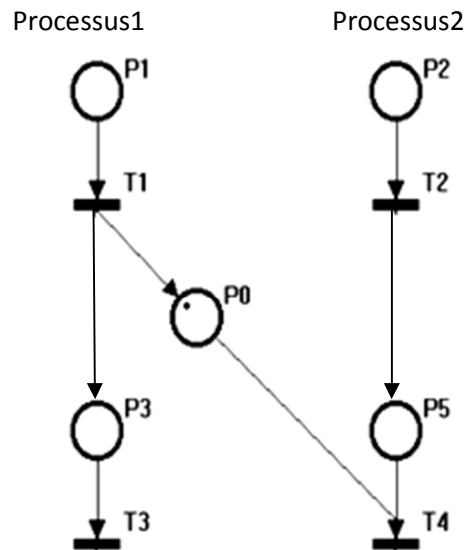


Figure I.12: synchronisation sémaphore

### ➤ Partage de ressources

Cette structure va modéliser le fait qu'au sein du même système plusieurs processus partagent une même ressource. Dans la figure ci-dessus, le jeton dans la place P0 représente une ressource mise en commun entre le processus 1 et le processus 2. Le franchissement de la transition T1 lors de l'évolution du processus 1 entraîne la "consommation" du jeton présent dans la place P0. La ressource que constitue ce jeton n'est alors plus disponible pour l'évolution du processus 2 puisque le franchissement de la transition T1 n'est plus possible. Lors de l'évolution du processus 1, lorsque la transition T2 est franchie, un jeton est alors "redonné" à la place P0 : la ressource redevient alors disponible pour l'évolution des deux processus.

On retiendra donc que la propriété d'exclusion mutuelle est garantie par l'utilisation exclusive du jeton de la place P0 par les processus P1 et P2 [2].

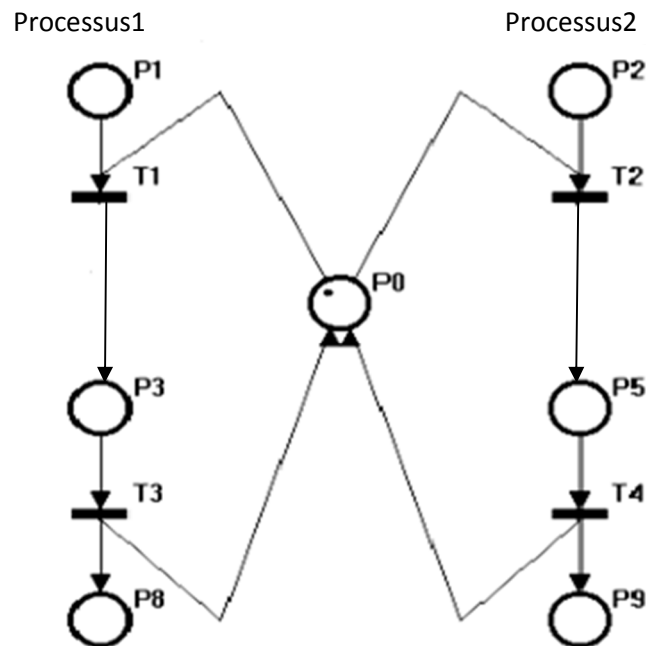


Figure I.13 : partage des ressources

### III.8.2. Réseau de Petri temporisé

La temporisation représente la durée minimale de franchissement ou le temps de séjour minimum d'un jeton dans une place. Les réseaux de Petri temporisés introduisent la notion de temps dans le parcours du réseau qui permettent de décrire un système à événements discrets dont le fonctionnement dépend du temps. Pour les réseaux de Pétri temporisés, les temporisations ont d'abord été associées aux transitions (T-temporisés), puis aux places (P-temporisés).

Les réseaux de Petri T-temporisés fonctionnent de la manière suivante: lorsqu'un jeton franchit une transition, celui-ci est réservé pendant un certain temps. C'est seulement après ce temps d'attente que le jeton franchira effectivement la transition. Les RdP T-temporisés et P-temporisés sont équivalents [3].

#### a. RdP P-temporisés

Dans un RdP P-temporisé à 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 générale  $d_i$  pourrait être variable.

Un RdP P-temporisé est un doublet  $\langle R, \text{Tempo} \rangle$  tel que :

R est un RdP marqué ;

Tempo est une application de l'ensemble P des places dans l'ensemble des nombres réel positifs ou nuls.  $\text{Tempo}(P_i) = d_i$  =temporisation associée à la place  $P_i$ .

**Principe de fonctionnement:** lorsqu'un jeton est déposé dans une place P, ce jeton doit rester au moins pendant le temps  $d_i$ . On dit que le jeton est **indisponible** pendant cette durée. Quand la temporisation  $d_i$  s'est écoulée, alors le jeton devient **disponible**.

A titre d'illustration, on considère l'exemple suivant dans lequel, on a associé une temporisation  $d_1$  pour la place  $P_1$  et une temporisation  $d_2$  pour la place  $P_2$  [2].

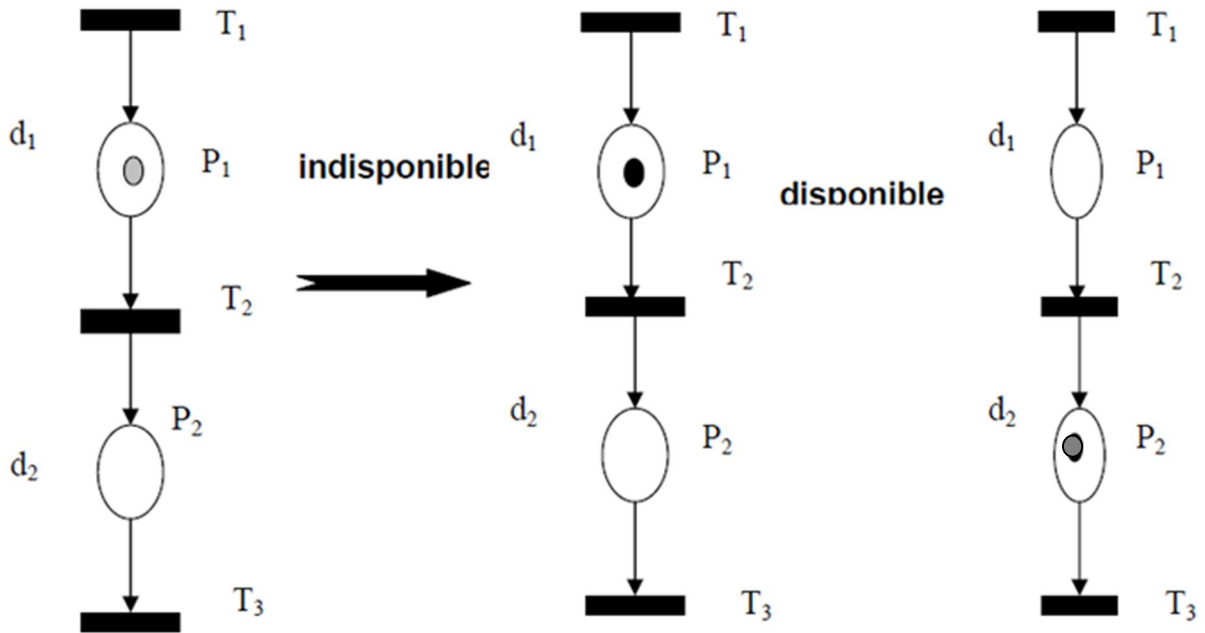


Figure I.14: le temps est associé à la place

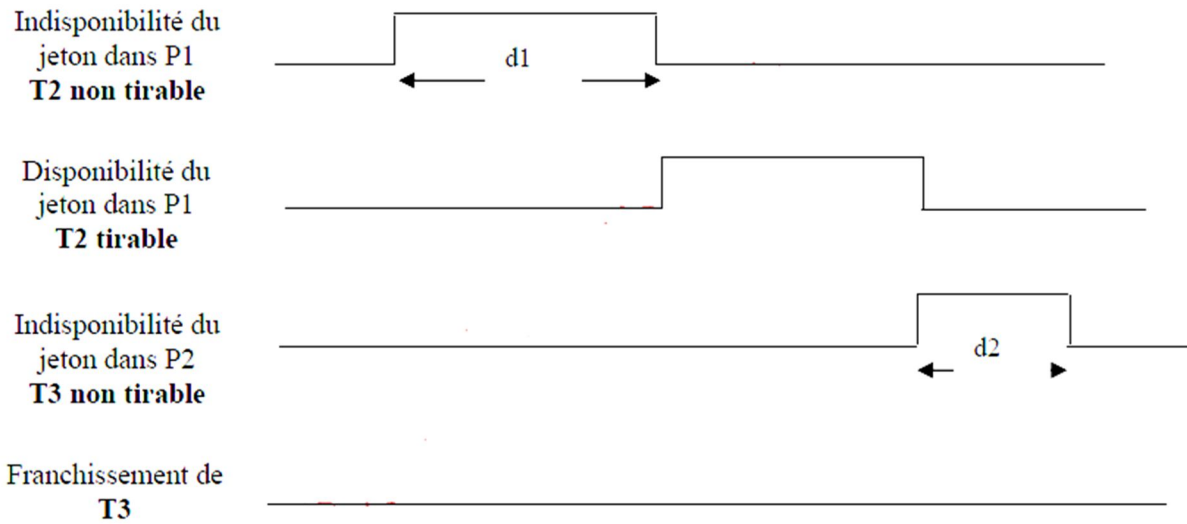


Figure I.15: disponibilité du jeton

**b. RdP T-temporisés**

Dans un RdP T-temporisé à chaque place  $T_i$  est associée une temporisation  $d_j$ , éventuellement nulle. Nous considérons le cas où  $d_j$  est une valeur constante, mais dans un cas générale  $d_j$  pourrait être variable.

Un RdP T-temporisé est un doublet  $\langle R, \text{Tempo} \rangle$  tel que :

- R est un RdP marqué ;
- Tempo est une application de l'ensemble des transitions dans l'ensemble des nombres réel positifs ou nuls.  $\text{Tempo}(P_i) = d_t$  est temporisation associée à la transition [1]  $T_j$ .

[1]  $T_j$ .

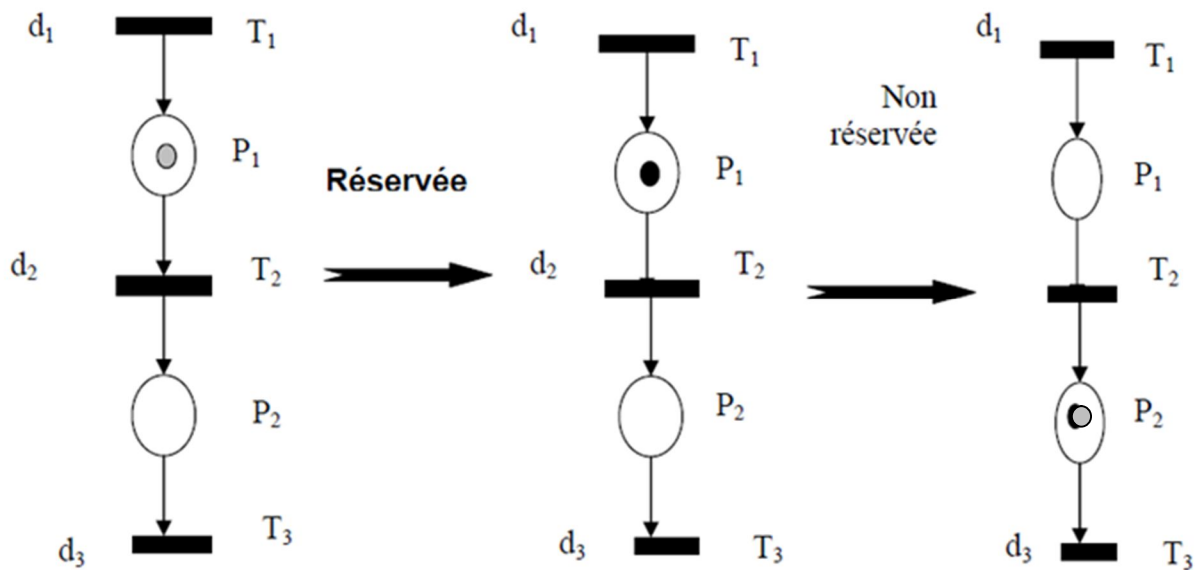


Figure I.16: le temps est associé à la transition

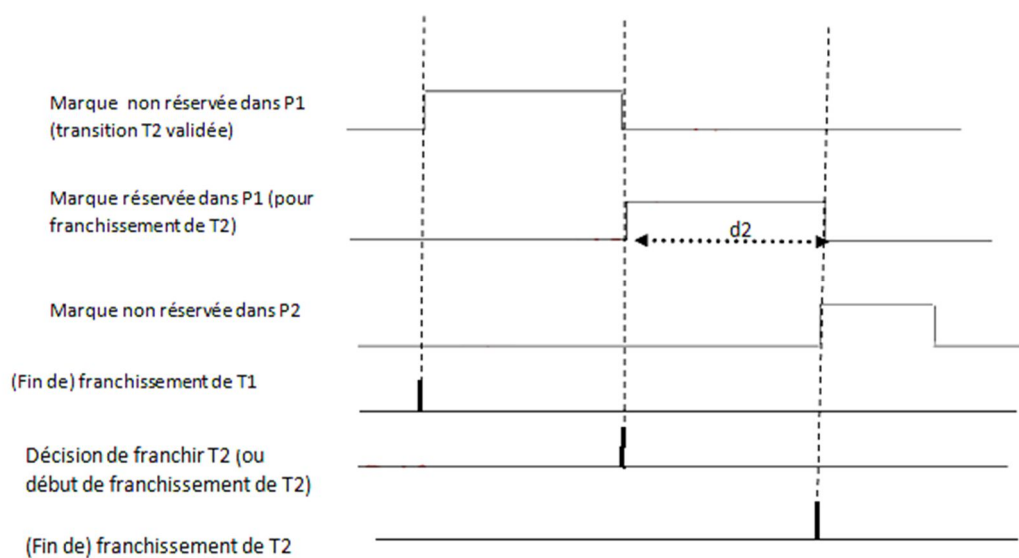


Figure I.17: Réserve d'une marque.

**Principe de fonctionnement :** Lorsque la transition  $T_1$  est franchie, une marque est déposée dans la place  $P_1$ , ce qui entraîne la validation de la transition  $T_2$ . On pourra donc décider le franchissement de  $T_2$  n'importe quand à partir de ce moment-là. A l'instant où le franchissement est décidé, 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 ajoutée dans  $P_2$ . Le marquage d'un réseau de Petri  $T$ -temporisé est donc composé de marques réservées et de marque non réservées. La transition  $T_j$  est validée si les marques non réservées sont en nombre suffisant pour la valider. On peut alors réserver, à l'instant  $t$ , les marques nécessaires à son franchissement. Les marques restent réservées dans l'intervalle  $]t, t+d_j]$  [et le franchissement est effectué à l'instant  $t+d_j$ . A l'instant initial, toutes les marques sont non réservées [4].

#### IV. Les principales propriétés des RdP

##### IV.1. Réseau de Petri borné

**Définition :** Une place  $P_i$  est bornée pour un marquage initial  $M_0$  si pour tout marquage accessible à partir de  $M_0$ , le nombre de marques dans  $P_i$  reste borné quelle que soit l'évolution du RdP. Elle est dite  $k$ -bornée si le nombre de marques dans  $P_i$  est toujours inférieur ou égal à  $k$ . Un RdP marqué est  $(k)$  borné si toutes ses places sont  $(k)$  bornées.

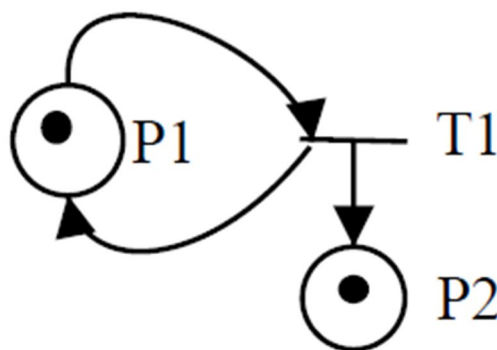


Figure I.18 : RdP non borné

Un RdP marqué peut ne pas être borné : sur l'exemple représenté dans la figure (17), la transition  $T_1$  admet la place  $P_1$  comme unique place d'entrée. La place  $P_1$  a une marque : la transition  $T_1$  est franchissable. Comme  $P_1$  est aussi place de sortie de  $T_1$ , le franchissement de  $T_1$  ne change pas le marquage de  $P_1$ . La transition  $T_1$  est donc franchissable en permanence et peut donc être franchie un nombre de fois infini. Chaque franchissement de  $T_1$  ajoutant une marque dans la place  $P_2$ , le marquage de celle-ci peut donc tendre vers l'infini. Donc il s'en suit que le RdP est qualifié de non borné [1].

## IV.2. Réseau vivant

La propriété de vivacité examine si une partie ou l'ensemble du réseau peut ou non évoluer. Une transition  $T_j$  est vivante pour un marquage initial  $M_0$  si pour tout marquage accessible  $M_k$ , il existe une séquence de franchissements à partir de  $M_k$  contenant  $T_j$  :

$$M_0 \longrightarrow M_k$$

$$M_0 \xrightarrow{S_k} M_k \xrightarrow{S'_k} M'_k$$

Tel que  $T_j \in S_2$

Un RdP marqué est vivant pour un marquage initial  $M_0$  si toutes ses transitions sont vivantes pour ce marquage initial.

Si une transition  $T_j$  est vivante alors, à tout instant, on sait que  $T_j$  peut être franchie au cours de l'évolution du RdP. Dans le cas d'un RdP modélisant un système fonctionnant en permanence, si une transition n'est pas vivante et si une fonction du système est associée au franchissement de cette transition, cela veut dire qu'à partir d'un certain instant, cette fonction ne sera plus disponible dans le futur, ce qui peut traduire une erreur ou une panne [2].

## IV.3. RdP quasi vivant

Une transition  $T_j$  est quasi vivante pour un marquage initial  $M_0$  s'il existe une séquence de franchissements à partir de  $M_0$  contenant  $T_j$ . Il s'en suit qu'un RdP est quasi vivant pour un marquage initial  $M_0$  si toutes ses transitions sont quasi vivantes pour ce marquage initial. Conséquemment, une transition qui n'est pas quasi-vivante est inutile [2].

### Exemple

-Une transition quasi-vivante:

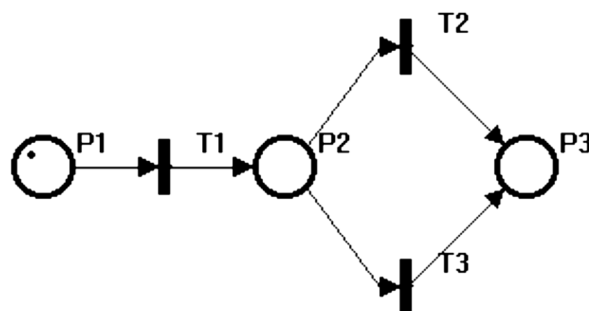


Figure I.19: un RdP avec une transition quasi vivante

La transition  $T_1$  est quasi vivante pour le marquage initial  $M_0$ .  $T_1$  est tirable au moins une fois.

-Un RdP quasi-vivant:

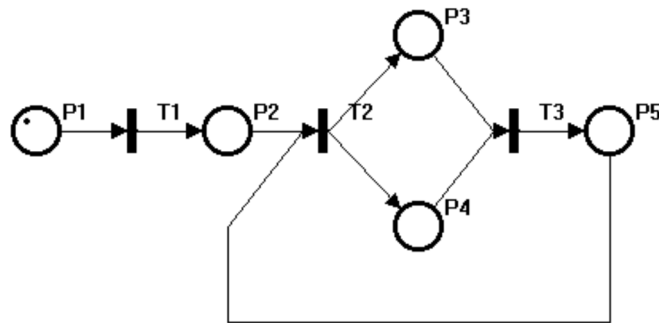


Figure I. 20: RdP quasi vivant

Toutes les transitions sont quasi vivantes pour le marquage initial  $M_0$ .

Donc le réseau de Petri est quasi vivant car toutes ces transitions sont quasi vivantes.

#### IV.4. État d'accueil

Un RdP possède un état d'accueil  $M_a$  pour un marquage initial  $M_0$  si pour tout marquage accessible  $M_i$  il existe une séquence de tirs  $S$  telle que  $M_i[S > M_a$ . Il s'en suit qu'un RdP est réinitialisable (ou réversible) pour un marquage initial  $M_0$  si  $M_0$  est un état d'accueil [2].

#### IV.5. Les invariants

A partir d'un marquage initial, le marquage d'un RdP peut évoluer par franchissement de transitions ; et s'il n'y a pas de blocage, le nombre de franchissements de transitions est illimité. Néanmoins, on ne pourra pas atteindre n'importe quel marquage et on ne pourra pas franchir n'importe quelle séquence de transitions. Des invariants permettent de caractériser certaines propriétés des marquages accessibles et des transitions franchissables, quelle que soit l'évolution [1].

##### a) Composante conservative :

Soit un RdP à  $m$  places. On a un **invariant** linéaire de places s'il existe une pondération sur le marquage des places tel que :

$q_1 m_1 + q_2 m_2 + \dots + q_n m_n = c^{st}$ , pour tout marquage accessible, les  $q_i$  étant des nombres entiers naturels. L'ensemble des places  $P$  telles que leur pondération soit non nulle est une composante conservative.

Le réseau est dit conservatif si et seulement si l'ensemble de toutes les places du RdP forme une composante conservative.

La propriété d'être composante conservative est indépendante du marquage initial. Par contre, la constante  $C$  de l'invariant dépend du marquage initial.

En règle générale, une composante conservative a une signification physique. Elle peut signifier soit qu'un système est dans un seul état à la fois, soit la conservation du nombre d'entités.

### Dans l'exemple suivant

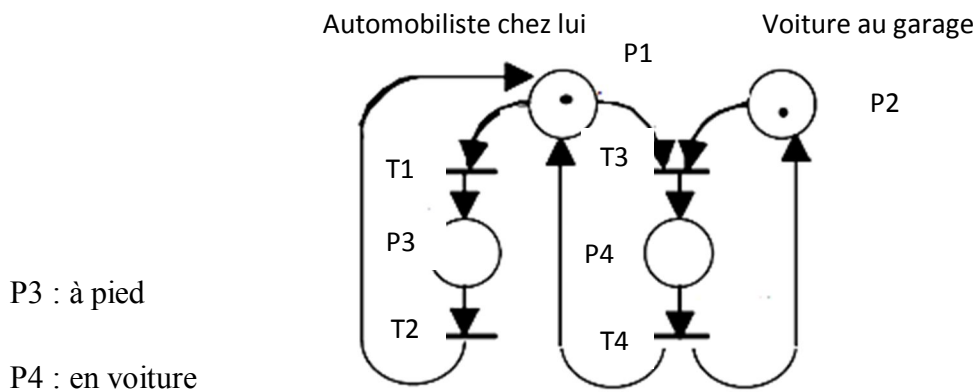


Figure I. 21 : Les composantes conservatives

Les composantes conservatives sont :

- $\{P1, P3, P4\}$  :  $m1 + m3 + m4 = 1$  (l'automobiliste est soit chez lui soit à pied soit en voiture)
- $\{P2, P4\}$  :  $m2 + m4 = 1$  (la voiture est soit au garage soit avec l'automobiliste)
- $\{P1, P2, P3, P4\}$  :  $m1+m2+m3+2.m4 = 2$ .

#### b) Composante répétitive :

Pour bien comprendre on prend comme exemple le RdP de la figure qui suit :

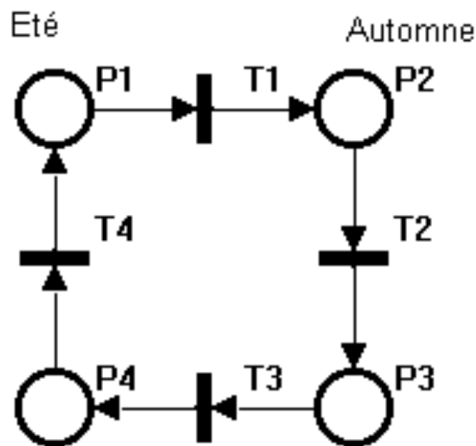


Figure I. 22 : composante répétitive

Les séquences de franchissements qui sont possibles à partir du marquage initial  $M_0$  de la figure (21) sont les suivantes : T1, T1T2, T1T2T3, T1T2T3T4, T1T2T3T4T1, etc. La séquence de franchissement T1T2T3T4 est particulière parce que  $M_0 [T1T2T3T4 > M_0$ . cette séquence ramène à l'état initial. On pourra donc les répéter. C'est une **séquence répétitive**. Une séquence répétitive qui contient toutes les transitions (chacune au moins une fois) est une séquence **répétitive complète**.

## V. Méthodes d'analyse de réseau de Petri

### V.1. Graphe des marquages et arborescence de couverture

#### a. Graphe des marquages

Le graphe des marquages est composé de nœuds qui correspondent aux marquages accessibles, et d'arcs correspondant aux franchissements de transition faisant passer d'un marquage à l'autre. La figure qui suit représente un RdP avec son marquage initial  $M_0 = (1, 0, 0, 0)$ . Après le franchissement des transitions l'une après l'autre on va obtenir les marquages  $M_1, M_2, \dots, M_k$

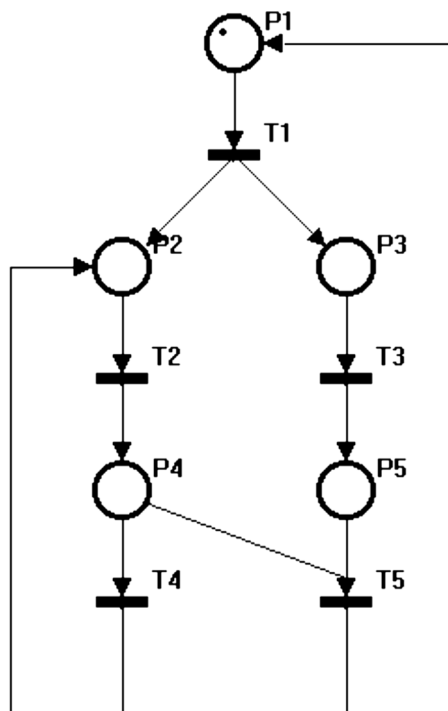


Figure I. 23 : RdP avec son marquage initial

L'évolution du RdP peut être représenté sous la forme d'un **graphe des marquages**  $GA(R, M_0)$ , dont les sommets correspondent aux marquages accessibles [2].

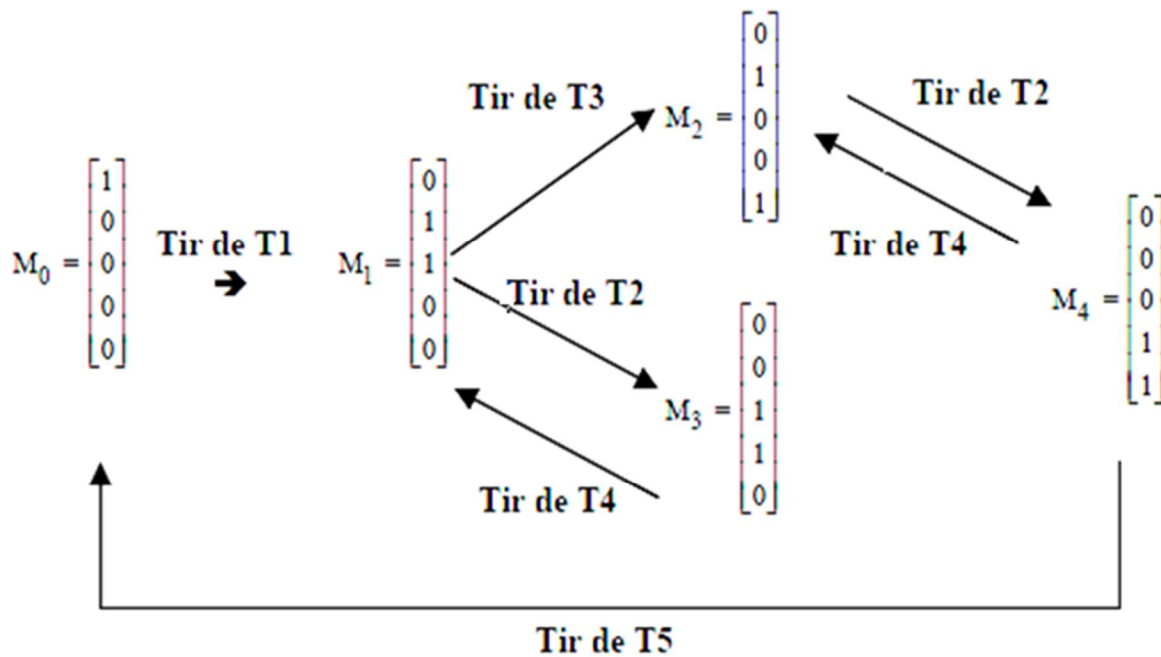


Figure 1.24 : Le graphe des marquages.

### b. Arborecence et graphe de couverture

Un graphe de couverture est un graphe particulier dans lequel il n'y a pas de boucle ni de circuit.

#### ➤ Algorithme de construction de l'arbre de couverture

**Pas 1 :** A partir du marquage initial  $M_0$ , on indique toutes les transitions validées et les marquages successeurs correspondants. Si un de ces marquages est strictement supérieur à  $M_0$ , on met  $w$  pour chacune des composantes supérieures aux composantes correspondantes de  $M_0$ .

**Pas 2 :** Pour chaque nouveau marquage  $M_i$  de l'arbre, on fait soit le pas 2.1 soit le pas 2.2.

**Pas 2.1 :** S'il existe sur le chemin de  $M_0$  à  $M_i$  (ce dernier exclu) un marquage  $M_j = M_i$ , alors  $M_i$  n'a pas de successeur.

**Pas 2.2 :** S'il n'existe pas de marquage  $M_k = M_i$  sur le chemin de  $M_0$  à  $M_i$ , alors on prolonge l'arbre en ajoutant tous les successeurs de  $M_i$ . Pour chaque successeur  $M_k$  de  $M_i$  : (a) une composante  $\omega$  de  $M_i$  reste une composante  $\omega$  de  $M_k$  ; (b) s'il existe un marquage  $M_j$  sur le chemin de  $M_0$  à  $M_k$  tel que  $M_k > M_j$ , alors on met  $\omega$  pour chacune des composantes supérieures aux composantes de  $M_j$  [5].

**Exemple**

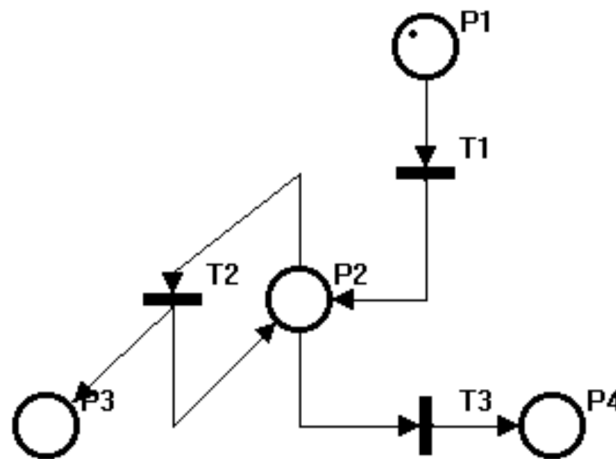


Figure I.25 : RdP avec son marquage initial.

Dans ce cas le graphe des marquages accessibles n'est pas fini. Le graphe de couverture est représenté par la figure suivante :

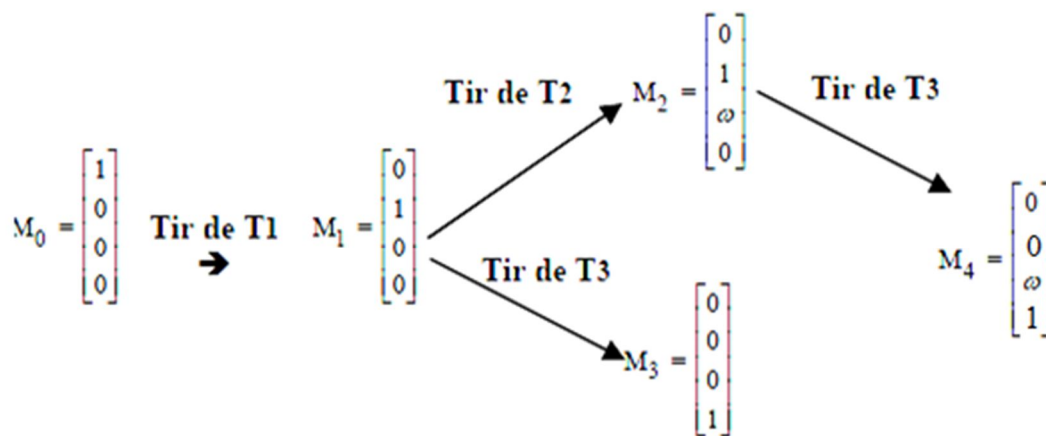


Figure I. 26: Arbre de couverture.

**V.2. Matrice d'incidence et équation d'état**

➤ **Matrice d'incidence :**

**Définition [2] :**

Soit R un réseau de Petri.

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

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} T_1 & T_2 & \dots & T_j & \dots & T_m \end{matrix} \\ \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_i \\ \vdots \\ P_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} & & & & & \\ & & & & & \\ & & & W_{ij} & & \\ & & & & & \\ & & & & & \end{bmatrix} \end{matrix}$$

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

Avec :  $W^+_{ij} = \text{Pré}(P_i, T_j)$ ,  $W^-_{ij} = \text{Post}(P_i, T_j)$

Franchissement :

Soit  $M[t > M']$ . On a :

$$M'(p) = M(p) + \text{Post}(p, t) - \text{Pré}(p, t) = M(p) + W(p, t).$$

On prend comme exemple la figure suivante :

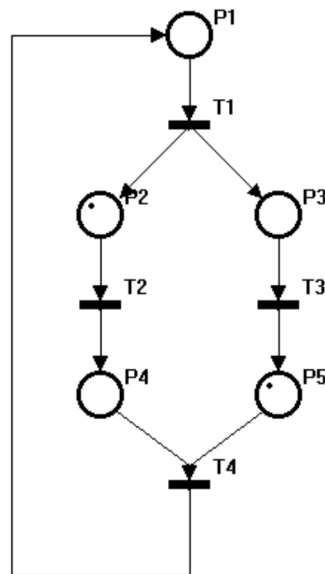


Figure I.27 : un RdP marqué

$$W^- = \begin{matrix} & \begin{matrix} T1 & T2 & T3 & T4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} P1 \\ P2 \\ P3 \\ P4 \\ P5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} ; W^+ = \begin{matrix} & \begin{matrix} T1 & T2 & T3 & T4 \end{matrix} \\ \begin{matrix} P1 \\ P2 \\ P3 \\ P4 \\ P5 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

On a:

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

Donc:

$$W = \begin{matrix} & \begin{matrix} T1 & T2 & T3 & T4 \end{matrix} \\ \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & +1 \\ +1 & -1 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & +1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & +1 & -1 \end{bmatrix} & \begin{matrix} P1 \\ P2 \\ P3 \\ P4 \\ P5 \end{matrix} \end{matrix}$$

-Une colonne de cette matrice correspond à la modification du marquage apportée par le franchissement de la transition correspondante par exemple, la première colonne de W indique que le franchissement à la transition T1 consiste à :

- Enlève un jeton de la place P1.
- Ajouté un jeton à la place P2.
- Ajouté un jeton à la place P3.
- Aucune modification pour la place P4.
- Aucune modification pour la place P5.

➤ **Equation fondamentale**

**Notion d'état**

Soit  $M_k$  obtenu après la  $k^{\text{ème}}$  exécution du réseau, avec  $k \geq 0$ , le marquage  $M_{k+1}$  est obtenu comme suit

$$M_{k+1} = M_k + C u_k$$

$U_k$  est un vecteur colonne de dimension  $(n \times 1)$  composé d'entier non négatifs, appelé vecteur de franchissement. L'équation précédente est appelée équation d'état. Puisque le nombre de marques dans une place n'est pas négatif, alors :

$$M_k + C u_k \geq 0 \text{ pour tout } k \geq 0$$

En supposant que  $M_f$  est accessible à partir de  $M_0$  à travers une séquence de franchissement, nous avons :

$$M_1 = M_0 + C u_0$$

$$M_2 = M_1 + u_1$$

.

.

$$M_f = M_{f-1} + C u_{f-1}$$

En combinant ces équations, nous obtenons :

$$M_f = M_0 + CU$$

Ou :

$$U = \sum_{k=1}^f U_k$$

Le vecteur  $U$ , de dimension  $(n \times 1)$ , est un vecteur colonne d'entiers non négatifs appelé le vecteur de franchissement. La  $j^{\text{ème}}$  composante de  $U$  représente le nombre de fois que la transition  $T_j$  doit être franchie pour transformer  $M_0$  en  $M$  [4].

### V.3. Les invariants

#### a) Notion de p-invariants

##### Définition 1

Un p-invariante est un vecteur Compose d élément entiers non négatifs solution de :

$$W^T X = 0$$

Ou :

$W$  est la matrice d'incidences et  $X \in \mathbb{N}^m$

##### Définition 2

On appellera alors support de  $X$ , dénote  $\|X\|$ , l'ensemble des places  $P$  qui correspondent aux composantes non nulles de  $X$ . Le vecteur  $X$  est dit minimal si et seulement si  $\|X\|$  ne contient d'autre support  $\|X'\|$  que lui-même et l'ensemble vide.

##### Propriété

Si  $X$  est un p-invariant alors, quelque soit le marquage initial  $M_0$  et, pour tout marquage accessible  $M$ , on a :

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

Cette relation exprime la conservation du marquage des places appartenant à  $\|X\|$  indépendamment de l'évolution de réseau.

##### Définition :

On appelle composante conservative d'un réseau de Petri le support du

p -invariant.

De plus, si l'ensemble des places  $P$  est lui-même une composante conservative, on dira que le réseau est conservatif.

## B) Notion de t-invariant

### Définition

Un t-invariant est un vecteur  $Y$  à composantes entières non négatives solution de :

$$WY = 0$$

### Définition

Le support d'un t-invariant est noté  $\|Y\|$ , l'ensemble des transitions qui correspondent aux composantes non nulles de  $Y$ .

### Propriété

Considérons une séquence de franchissement  $S$  telle que son vecteur caractéristique  $S'$  soit t-invariant, on a :

$$M = M_0 + W \cdot \vec{S}$$

Comme  $S$  est t-invariant :  $W \cdot \vec{S} = 0$  ; par conséquent,  $M = M_0$ .

Autrement dit, le franchissement de  $S$  est indéfiniment reproductible et le franchissement du réseau est caractérisé par une répétition stationnaire des transitions de  $S$ .

### Définition

Le support d'un t-invariant est appelé composante répétitive stationnaire du réseau. Si de plus, l'ensemble de toutes les transitions est lui-même une composante répétitive stationnaire, on dira que le réseau est répétitif stationnaire.

### Définition

Soit  $S$  un sous ensemble de  $T$  ;  $S$  est une composante répétitive si et seulement s'il existe une séquence de franchissement  $S$  tel que :  $\|\vec{S}\| = S$  et  $W \cdot \vec{S} \geq 0$

$\vec{S}$  : Vecteur caractéristique de  $S$ .

## VI. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre le formalisme de RdP. Les RdP sont particulièrement bien adaptés à la description des aspects dynamiques ou les comportements d'un système. Des concepts tels que la concurrence ou la synchronisation entre interactions s'expriment aisément dans le cadre de ce formalisme.

L'avantage des RdP par rapport à la grande majorité des autres représentations, est leur aptitude à donner des informations concernant l'exécution du système.

De la théorie mathématique, on peut déduire un certain nombre de propriétés (invariants, vivacité, existence d'un état d'accueil, ...etc.) qui sont autant d'informations à la disposition du concepteur pour se faire une idée du comportement de son système.

## I. 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 organiser les ateliers de productions. Dans le présent chapitre, nous nous intéressons à la description d'une chaîne de production des tubes métalliques « tube soudé en spirale » ; cette entreprise de fabrication « ANABIB » est issue de la restructuration organique de l'ex SNS (Société Nationale de Sidérurgie), le siège social de la société est situé en zone industrielle de Réghaia, route nationale N° 5, Réghaia – Alger. Avec un capital de 1.739.560.000 DA.



Figure II.1 :L'entreprise ANABIB.

Notre intention au cours du deuxième chapitre est de mettre en vis-à-vis le type de système auquel nous nous intéressons. Nous précisons progressivement les mots clés de la problématique que nous développons.

## II. Description et rôle de la chaîne de production

### II.1. Le rôle de la chaîne de production

L'objectif de l'étude est un atelier de production « tube soudé en spirale », destiné pour la fabrication des pipelines de différents diamètres de 8" à 36" (219 mm à 914 mm). L'une des spécifications de processus de fabrication des tubes métalliques est de produire des tubes soudés en spirale régit par la norme API Q1, il est constitué en conséquent par une ligne à tubes pour les opérations de formage et de soudage en utilisant comme matière première des bobines d'acier, du fil de soudage et du flux.

## II.2. Description du processus

Une fois que le tube est formé et soudé par la machine SP1200, il est découpé après avoir atteint une longueur de 12m. Ce tube subit ensuite un contrôle visuel ou il va être décidé s'il n'y a pas de défauts, dans le cas où le défaut est détecté le tube sera transféré vers la zone de réparation ou bien celle de chutage ou le type de défaut est identifié par des bandes de couleur par exemple : une bande verte veut dire un tube déclassé (destiné pour l'eau), une bande rouge c'est un tube à réparer, une bande bleue veut dire un tube réparé, ...

Dans le cas où il n'y a pas de défauts, le tube va continuer son processus en passant dans une autre machine pour une opération de chanfreinage des extrémités des tubes.

Ensuite un test hydrostatique pour confirmer le test visuel. L'étape suivante consiste à un contrôle par ultra-son de tout le tube, que ce soit le métal de base ou bien le cordon du soudeur, si le contrôle ultra-son détecte un défaut, la zone en question sera soumise à un contrôle par RX pour confirmer l'amplitude du défaut.

### Le domaine d'application

Le produit de cet atelier est destiné essentiellement pour :

#### a. canalisation pour transport de fluides

- Eau
- Pétrole
- Gaz

#### b. Construction métallique

- Support de construction (poteaux)
- Pieux battus pour fondations ou forage
- Support d'éclairage (mât d'éclairage)

L'une des spécifications de la chaîne de fabrication c'est la production en spirale. Actuellement c'est l'unique chaîne de production qui fabrique ce type de tubes en Algérie.

## III. Synoptique générale de la chaîne

Notre atelier est constitué de différents éléments répartis en quatre halls suivant :

Pour les tables de stockage de ces halls on s'intéresse aux tubes de diamètre 20" (équivalent à 508 mm) :

### III.1. Premier hall

❖ Ce hall est composé de :

#### a. Deux zones stockages :

- une zone pour le stockage de fil et flux
- une pour le stockage des bobines d'acier.

**b.** Deux machines pour le formage des tubes:

- La machine(C) SP1200
- La machine(D) N-L-A-T et un générateur pour cette machine.

**c.** Une table pour peser les bobine d'acier.

### **III.2. Deuxième hall**

❖ Ce hall est composé de :

**a.** Zones de réparations :

- Une zone de réparation pour chaque machine de formage.
- Une zone de réparation pour les tubes fabriqués par machine **C**
- Une zone de réparation pour les tubes fabriqués par la machine **D**.

**b.** Deux tables de contrôle visuel :

- une table de contrôle visuel pour les tubes fabriqués par machine1.
- une table de control visuel pour les tubes fabriqués par la machine2.

**c.** Trois tables de stockage :

- Une table de stockage pour les tubes fabrique par machine **C**
- Une table de stockage pour les tubes fabriqué par la machines **D**
- Une table de stockage pour les tubes conforme.

### **III.3. Troisième hall**

❖ Ce hall est composé de :

**a.** Trois machines :

- Machine chanfreineuse.
- Machine de test hydro –statique.
- Machine de test ultrason.

**b.** Tables machines :

- Table chanfreineuse.
- Table machine ultrason.
- Table banc hydro.

**c.** Cabines machines :

- Cabine banc-hydro.
- Cabine ultrasons.

**d.** Autre tables :

- Table de tirage
- Table de stockage ULTRASON
- Table Tube Étalons.
- Table de transfert.

- Table de stockage pour les tubes conforme.

#### III.4. Le hall 4

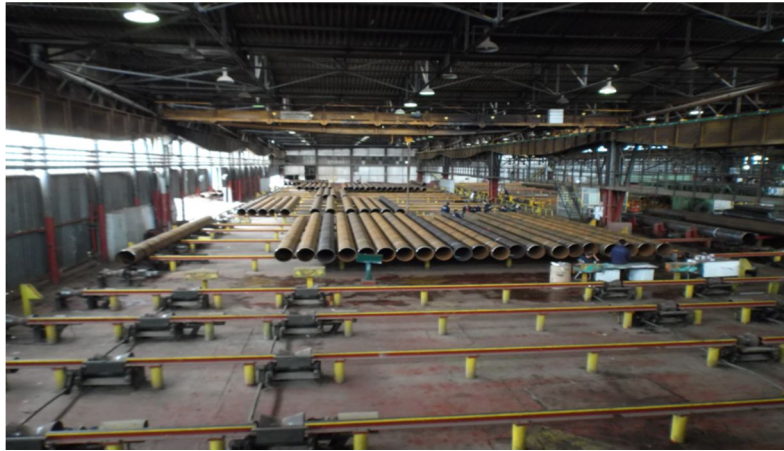


Figure II.2 : composition de hall (4)

- ❖ Ce hall est composé de :
  - Tables de contrôle (06 tables).
  - Tables des cabines RX.
  - Cabines RX (04 chambres).
  - Une nouvelle radio scopie
- ✓ Les clients potentiels sont constitués de :
  - Secteur de l'énergie.
  - Secteur de l'hydraulique.

#### IV. composition et rôle de chaque élément

##### IV.1. La machine SP1200

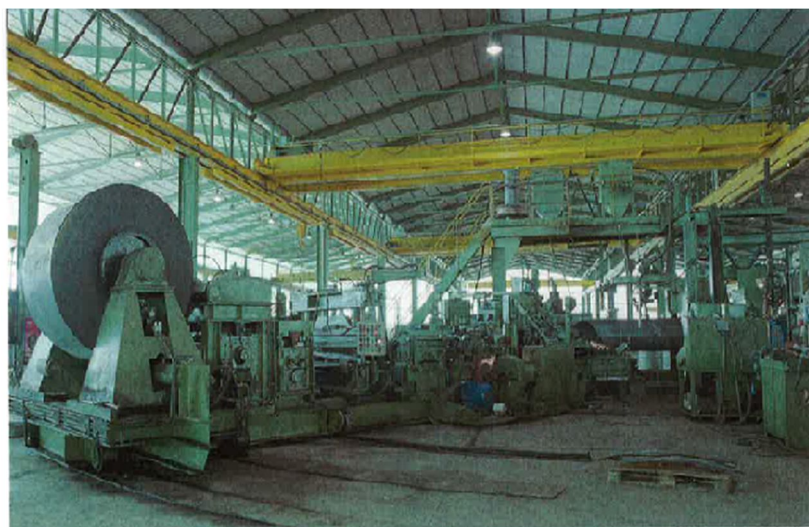


Figure II.3 : Machine de fabrication des tubes métalliques soudés en spirale.

Cette machine de fabrication de tubes métalliques soudés en spirale est un équipement complet pour souder des tubes en acier. Cette ligne de production est composée d'un dérouleur, d'un égaliseur, d'une soudeuse bout à bout, d'une boucle, d'une dresseuse et d'un planage, d'une unité de guidage latéral, d'une machine de cisailage de fin et de soudage bout à bout, d'un lamineur latéral, d'une unité de nettoyage de plaque (optionnel), d'un système d'entraînement principal, d'une unité de pré courbage, d'une machine de profilage, unité de soudage interne, unité de soudage externe . Dans notre atelier il existe deux machine de fabrication des tubes, la machine SP1200 et aussi la machine N-L-A-T mais dans notre travaille nous intéressons à la machine SP1200, cette machine fabrique des tubes de différents diamètres, on variant l'angle de cette machine.

#### IV.2. La machine N-L-A-T

C'est une machine de fabrication des tubes métalliques elle a le même fonctionnement et composants que la machine SP1200, la seule différence c'est l'angle machine telle que la SP1200 en calcul l'angle machine avec l'équation " $\sin \alpha$ " et la machine N-L-A-T l'angle machine est calculé avec l'angle " $\cos \alpha$ ".

- **Le rôle de deux machines :** La machine de fabrication des tubes soudés en spirale est principalement utilisée pour produire des tubes hélicoïdaux. Elle est capable de produire des tubes avec un diamètre large en utilisant la matière première étroite. Cette chaîne de production de tube soudée peut aussi être utilisée pour fabriquer les tubes soudés avec différents diamètres. La machine de fabrication de tubes soudés adopte une production continue et elle produit aussi les tubes soudés par soudure droite selon la norme API en termes de qualité. Les bobines d'acier sont étalées et aplanis par notre équipement de laminage. Ils sont ensuite envoyés dans la machine de profilage selon un certain angle. Les tuyaux continus sont formés par notre machine de roulage à trois rouleaux. La soudure hélicoïdale (spirale) continue est soudée par la machine de soudage à arc submergé.

#### IV.3. La machine chanfreineuse



Figure II.4 : La machine chanfrein (lameuse).

Cette machine à chanfreiner d'usinage d'extrémité est constituée de l'équipement d'alimentation, des colliers de serrage, le châssis de couteau, l'embrayage et d'autres parties. Equipé avec le couteau de chanfreinage les angles finis sont uniformes.

➤ **Le rôle de la machine :** Le chanfreineur de tubes à soudeuse en spirale est utilisé pour aplatir les extrémités des tubes à soudeuse hélicoïdaux ou des tubes en acier sans soudeuse et des angles finis. Les extrémités de la machine de découpe de tubes laissent généralement des bavures et des défauts, afin de répondre au processus suivant et aux besoins des utilisateurs, les bavures des extrémités des tubes, les cotés internes et externes doivent être ébavurées, (le temps moyen de chanfrein est 7m et 50s).

#### IV.4. Machine de test hydrostatique



Figure II.5 : la machine test hydrostatique.

La machine de test hydrostatique est l'un des principaux produits de test de pression de tuyaux en acier et d'élimination de stress interne au tuyau. Le test hydrostatique est demandé par les réglementations techniques afin d'examiner le tube après un traitement mécanique (pliage, déformation, etc.). Le testeur hydrostatique de tubes d'acier est le principal outil de test pour le tube soudé. Malgré différents styles de structure, le processus technologique change peu : positionnement, serrage, remplissage d'eau, augmentation de la pression, maintien de la pression, relâchement de la pression et circulation d'eau. Cette machine de test hydrostatique est contrôlée par un système API (PLC), ce exécute chaque étape et fournit automatiquement le résultat du test.

➤ **Le rôle de machine de test hydrostatique :** Le testeur hydrostatique de tubes à soudeuse hélicoïdale (spirale) est principalement utilisé pour réaliser des tests de pression (on appliquant une pression de 184 bars) sur les tuyaux à soudeuse hélicoïdale ou à soudeuse droite. Ce testeur hydrostatique utilise l'eau pour vérifier si le tuyau a été soudé correctement ou non...(le temps moyen de tester un tube est 6m et 40s)

#### IV.5. La machine test ultrason

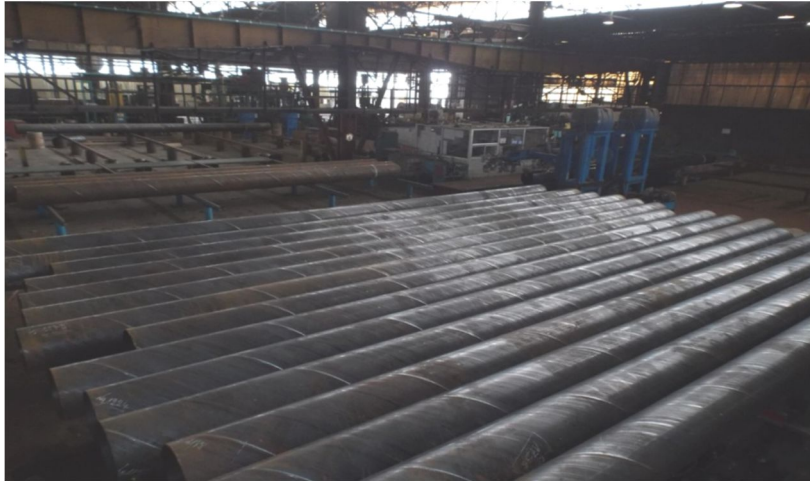


Figure II.6 : la machine ultrason

Une onde ultrasonore est émise par un transducteur placé sur la surface du matériau à contrôler et se propage dans le matériau. Il existe des méthodes par contact (le palpeur est en contact avec la pièce) ou par immersion (la pièce et le palpeur sont immergés dans de l'eau). Dans le cas de la méthode par contact, il est nécessaire d'ajouter un couplant (eau ou gel) entre le palpeur et la pièce pour assurer la transmission des ondes (c'est notre cas). Lorsque ces ultrasons rencontrent une interface délimitant deux milieux ayant des impédances acoustiques différentes. Il y a réflexion.

Dans le cas d'une pièce comportant deux surfaces, la détection de défaut se fait en comparant le temps mis pour faire un aller retour dans l'épaisseur de la pièce et le temps mis pour la réflexion sur un défaut. La figure suivante représente ce cas de contrôle :

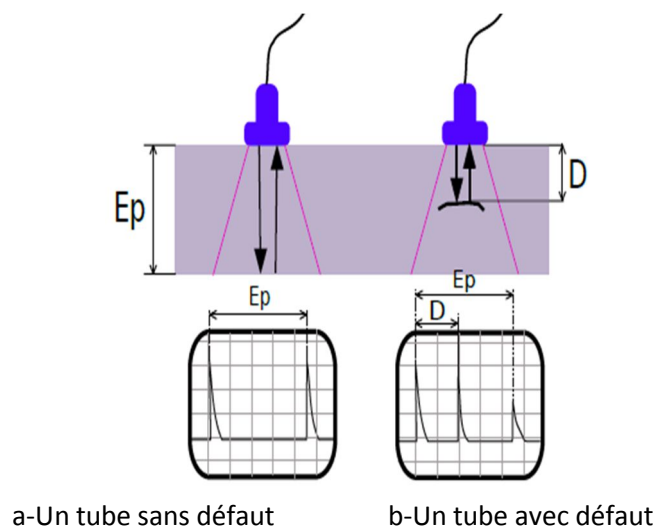


Figure II.7 : principe de contrôle par ultrason.

- **Le rôle de la machine test ultrason** : Le contrôle par ultrasons est une méthode de contrôle permettant la détection de défaut à l'intérieur d'un matériau. Le contrôle par ultrasons est basé sur la transmission et la réflexion d'onde de type ultrasons à l'intérieur d'un matériau. Les ondes utilisées peuvent être libres (de compression ou de cisaillement) ou guidées (de surface ou de plaque). Le temps moyen de test ultrason est 5m et 50s avec une vitesse 80m/s.

#### IV.6. La radio scopie

La radiographie est un système d'imagerie permettant de mettre en évidence les structures internes de corps en utilisant le rayonnement X ou gamma. Dans notre atelier il existe deux types de la radiographie une classique et l'autre digitale. En radiographie digitale, le film classique est remplacé par un écran au phosphore placé dans une cassette antichoc réutilisable de manière quasi infinie. Ce procédé est donc plus écologique. Ce procédé est également plus rapides, en effet, une cassette est numérisée an quelques secondes tandis que le développement d'un film classique dure plusieurs minutes. De plus, les clichés numérisés permettent l'accentuation des contrastes sur différentes parties de l'image permanente de réduire le nombre de tirs pour les pièces d'épaisseur variable. Des annotations peuvent être apposées, facilitant la présentation et la compréhension des résultats.

- **Le rôle de cette radio** : La radiographie est une technique de contrôle non destructif (CND) qui permet de détecter des défauts internes volumiques (porosités, retassures, inclusions métalliques ou non,...) ou plans (fissurations, manques de fusion,...). De par sa complexité, sa matière, l'environnement extérieur de contrôle ou encore le but de l'examen, chaque tube à contrôler nécessite une approche, voire une technique de radiographie, différente.

#### IV.7. Les cabines RX



Figure II.8 : sortie de la cabine RX

Les cabines de contrôles RX permettent de réaliser en temps réel la radiographie, ainsi, il est possible d'observer rapidement le volume interne d'un tube sous différents angles. En reliant la cabine radiographie à un logiciel adapté. Il est, en outre, possible de reconstituer l'image radiographie de la pièce en trois dimensions, on appelle ce procédé la tomographie. Cette technique permet la mise en évidence d'indications volumiques et la mesure précise de leurs dimensions.

#### IV.8. Tables de stockages et contrôles

Les stocks sont des éléments qui permettent d'accumuler des articles entre deux machines. Ils sont composés des convoyeurs. Les stocks de notre atelier sont gérés par la méthode FIFO. Les tables de contrôles sont destinées à contrôler la qualité du produit, visuellement ou par mesurage (mesuré le poids d'un tube ou sa longueur). Ces tables ont des différentes longueurs.



Figure II.8 : Exemple d'une table de stockage

#### V. problèmes rencontrés

Le système de production à étudier est un système manufacturier composé d'un ensemble de machines séparées par des stocks. Les machines sont caractérisées par des taux de fabrication (moyen caractérise une vitesse de variation au cours du temps) et de temps moyen d'une opération (la moyenne entre plusieurs temps). La problématique abordée dans notre travail porte sur trois problèmes suivants :

- Chacune des machines puise des tubes à usiner dans un stock d'entrée et dépose les tubes finis dans un stock de sortie. Les stocks de sortie correspondent aux stocks d'entrée des machines devant réaliser les opérations suivantes sur les tubes. Ainsi, chaque tube doit passer dans un ordre bien défini par différentes machines entre lesquelles elles sont en attente dans les zones de stockages ou les stocks intermédiaires, c'est là où réside notre premier problème
- Une machine ne peut commencer à exécuter une opération que si le tube est présent dans le stock d'entrée et qu'il y a une place disponible pour entreposer le tube une fois usiné dans le stock de sortie. A savoir que la sortie d'une machine est une entrée d'un stocke intermédiaire (table de stockage) et la sortie de se dernier est une entré d'une autre machine,

et pour un bon fonctionnement l'opération doit se faire rapidement, dans notre atelier une machine est lente par rapport à une autre. c'est là où réside le deuxième problème.

- Notre atelier est une ligne de production où la commande est variée d'un client à un autre (différents diamètres), cette variation des commandes pose un problème d'occupation de grand espace à savoir que notre atelier n'est pas assez spacieuse. C'est là où se trouve notre troisième problème.

## **VI. Conclusion**

Une étude générale sur l'entreprise « ANABIB » a été faite dans ce chapitre dans le but de connaître les moindres détails des différents composants de la ligne de production et rôle de chaque élément de cet atelier. Ce chapitre est aussi consacré à la présentation des problèmes rencontrés dans notre étude.

## I. Introduction

Ce chapitre s'intéresse à la résolution de problèmes rencontrés dans l'atelier de production étudié. La méthode adoptée pour la résolution de ces problèmes est choisie suite à une étude préliminaire des approches de synthèse de contrôleurs. Elle considère le procédé à contrôler comme un système à événements discrets qui évolue en fonction d'occurrences d'événements spontanés, le principe de la supervision est d'interdire à un système donné d'atteindre un ensemble d'états interdits par un ensemble de contraintes.

Notre travail propose une synthèse de commande par supervision pour un système à événements discrets, en utilisant les réseaux de Petri (RdP), les événements sont représentés par les transitions, et les activités par des places, dans notre cas il existe des événements (transitions) contrôlables et des transitions non contrôlables.

## II. Concept de superviseur

### II.1. Principe de la supervision selon Ramadge et Wonham

Dans le cadre de cette théorie, le procédé est modélisé par un automate à états et son comportement est traduit par le langage que génère cet automate. L'objectif recherché est d'imposer au procédé G un comportement spécifié tout en respectant un ensemble de contraintes traduites par le modèle de spécification E. Le principe de cette théorie repose sur la notion de retour d'état. Le procédé G étant sous supervision, il reçoit à partir de l'état dans lequel il se trouve un ensemble d'événements autorisés par le superviseur S (voir figure 1) [6].

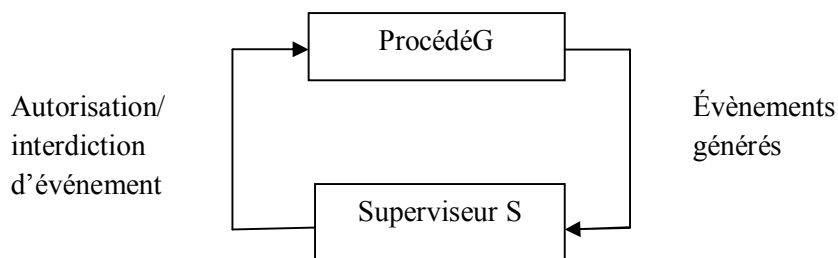


Figure III.1 : Structure de supervision (système en boucle fermée : S/G)

Le procédé est perçu comme un SED par le superviseur qui est lui-même un SED. En entrée, le superviseur S observe les événements produits par le procédé G. Chaque fois qu'un événement est observé, S fournit en sortie une liste d'événements interdits (ou autorisés) de se produire dans G. Le fonctionnement en boucle ouverte correspond à ce que peut potentiellement faire le procédé. Le procédé couplé avec son superviseur constitue le fonctionnement en boucle fermée. Dans ce fonctionnement, un événement ne peut être produit par le procédé que s'il est physiquement possible et non interdit par le superviseur.

La supervision modifie ainsi le fonctionnement du procédé afin de faire respecter les spécifications. Étant donné un procédé et un ensemble de spécifications logiques de fonctionnement, l'objectif de la théorie Ramadge et Wonham (RW) est de synthétiser un superviseur tel que le fonctionnement en boucle fermée résultant obéisse aux spécifications désirées [8].

## II.2. Définition d'un superviseur

Le superviseur  $S$  peut être défini par la structure suivante :  $S = (V, \Sigma, \xi, v_0, 2^{\Sigma_c}, \theta)$  où  $V$  est un ensemble fini d'états;  $\Sigma$  est l'alphabet d'entrée;  $\xi: V \times \Sigma \rightarrow V$  est la fonction de transition d'états;  $v_0$  est l'état initial;  $2^{\Sigma_c}$  est l'alphabet de sortie; et  $\theta: V \rightarrow 2^{\Sigma_c}$  est la fonction d'affectation de sortie [7].

Dans la **figure 1** représentant le fonctionnement en boucle fermée, l'automate  $G$  est couplé avec un superviseur  $S$ .

Formellement, on peut associer à ce superviseur une fonction  $f: L(G) \rightarrow \Gamma$ , telle que :

$$\Gamma = \{\gamma \in 2^{\Sigma} : \Sigma_{uc} \subseteq \gamma\}.$$

Un élément  $\gamma$  de  $\Gamma$  représente l'ensemble des événements autorisés (non interdits) par le superviseur. Tous les événements incontrôlables sont contenus dans les éléments de  $\Gamma$  puisque ces derniers ne peuvent pas être interdits. Pour chaque chaîne  $s$  générée par  $G$  ( $s \in L(G)$ ), le superviseur fournit en sortie une liste d'événements autorisés  $\gamma \in \Gamma$ . Le superviseur reçoit en entrée une chaîne d'événements  $s$  de  $L(G)$ , et fournit en sortie une liste d'événements autorisés  $\gamma = f(s)$ . Le superviseur remet à jour ses sorties à chaque occurrence d'un événement dans le procédé [7].

## III. Notion de contrôlabilité

### III.1. Événements contrôlables et événements non contrôlables

L'ensemble  $\Sigma$  des événements d'un procédé est décomposé en deux sous ensembles disjoints  $\Sigma_c$  et  $\Sigma_u$ , représentant respectivement l'ensemble des événements contrôlables et l'ensemble des événements non contrôlables. Les événements contrôlables ( $\Sigma_c$ ) sont les événements sur lesquels le superviseur peut avoir une action directe, c'est-à-dire, qu'il peut les interdire ou les autoriser. Par contre, le superviseur ne peut exercer aucune influence directe sur les événements dits non contrôlables ( $\Sigma_u$ ). Tous les événements de  $\Sigma_u$  sont toujours autorisés quelque soit l'événement généré par le procédé, la condition  $\Sigma_c \subseteq \gamma^i$  est toujours vraie pour tout  $i$  [7].

### III.2. Condition de contrôlabilité

Dans le cas général, pour déterminer un contrôleur permettant le respect d'un cahier des charges donné, il faut d'abord définir une spécification par un langage  $K$  ou un automate qui traduit fidèlement les contraintes imposées, et un procédé  $G$  défini par un langage  $L(G)$ . Le fonctionnement le plus permissif possible en boucle fermée, en respectant les conditions imposées par la spécification, est décrit par le langage  $K \subseteq \Sigma^*$  est dit contrôlable si seulement si :

$$K \cdot \Sigma_u \cap L(G) \subseteq K$$

C'est-à-dire  $K$  est contrôlable s'il n'existe pas un mot  $\omega\sigma$ , avec  $\omega \in K$  et  $\sigma \in \Sigma_u$  tel que  $\omega\sigma$  n'appartient pas à l'ensemble des événements non contrôlable ( $\Sigma_u$ ) : l'occurrence d'un événement non contrôlable ne fait pas sortir le système de la spécification [7].

## IV. Synthèse de superviseur basé sur les RdP

### IV.1. Méthode de commande basée sur les invariants de marquage

Cette méthode a été proposée par Yamalidou et Moody. Elle présente une nouvelle approche pour construire un contrôleur en boucle fermée d'un système modélisé par un RdP.

Le contrôleur se compose de places et d'arcs calculés à l'aide du concept d'invariants de marquage. Dans cette approche, les spécifications sont données par des contraintes linéaires sur le marquage des places du RdP. L'idée consiste à construire un invariant de marquage pour chaque contrainte, de telle manière que l'ensemble des marquages atteignables soit réduit aux seuls marquages vérifiant la contrainte.

Le contrôleur correspond à des places qui sont reliées aux transitions du RdP du procédé, c'est de cette façon qu'il est garanti que le système n'atteindra pas un état interdit. Le procédé combiné du RdP du procédé et du contrôleur, possède des invariants de marquage nécessaires pour assurer que l'ensemble de contraintes ne soit pas violé.

Dans le cas général, le contrôleur n'est pas nécessairement optimal, mais il est facilement calculé et sa taille est égale au nombre des contraintes. En outre, il peut être utilisé comme une très bonne estimation préliminaire pour les autres méthodes qui sont capables de calculer un contrôleur optimal d'un RdP. Sa dimension étant relativement petite, il simplifiera le calcul nécessaire pour atteindre le contrôleur optimal [6].

#### ➤ Notation et définition

Une séquence de franchissement  $S$  réalisable à partir d'un marquage  $M_i$  peut s'écrire:

$M_0 [S > M_k$ . Un marquage  $M$  est atteignable depuis  $M_0$  s'il existe une séquence  $S$  telle que  $M_0 [S > M$ .

La matrice d'incidence  $W$  associée à un RdP correspond à sa structure (indépendante du marquage), une colonne de cette matrice correspond à la modification du marquage apportée par le franchissement de la transition correspondant.

#### ➤ Équation fondamentale

A chaque séquence de franchissement, est associé un vecteur caractéristique noté  $S$ . C'est un vecteur de dimension  $n$  (nombre de transitions) où le composant numéro  $j$  correspond au nombre de franchissements de la transition  $T_j$  dans la séquence  $S$ .

Si la séquence de franchissement  $S$  est réalisable à partir d'un marquage  $M_i$ , le marquage atteint  $M_k$  est donné par l'équation fondamentale :

$$M_k = M_i + W \cdot S$$

$S$  est le vecteur caractéristique d'une séquence  $S$  qui mène de  $M_i$  à  $M_k$

### IV.2. Principe des invariants de places (P-invariants)

L'invariant de marquage est une propriété structurelle importante pour analyser les RdP car elle ne dépend pas du marquage initial. Elle permet d'étudier la structure du réseau indépendamment de toute évolution dynamique.

L'invariant de marquage correspond à une somme pondérée de marquages de places qui est constante quel que soit le marquage accessible [7].

Un invariant est déterminé à partir de vecteurs  $X$ , calculés en trouvant les solutions de l'équation suivante :

$$X^T \cdot W = 0$$

Où  $W$  est la matrice d'incidence du RdP de dimension  $m \times n$  et,  $X$  est un vecteur de dimension  $n$ .

### IV.3. Description de la méthode

Le système qui doit être contrôlé est modélisé par un RdP, ce réseau s'appelle modèle duprocédé, la matrice d'incidence du réseau du procédé est  $W_R$ . Il est possible que le comportement dynamique du procédé viole certaines contraintes imposées. Dans ce cas, un système de commande doit être synthétisé. Les contraintes qui doivent satisfaites peuvent être soit des expressions logiques, des égalités ou des inégalités.

Supposons que le système à commander est modélisé par un RdP ayant  $m$  places et  $n$  transition, et doit satisfaire la spécification suivante :

$$m_i + m_j \leq 1$$

Où  $m_i$  et  $m_j$  sont les marquages des places  $P_i$  et  $P_j$  respectivement. Cette contrainte veut dire qu'au plus, une de ces deux places soit marquée (les deux places ne peuvent pas être marquées en même temps). Cette inégalité peut être transformée en une égalité en introduisant une nouvelle variable  $m_s$ , donc la contrainte devient :

$$m_i + m_j + m_s = 1$$

La variable  $m_s$  représente dans ce cas une nouvelle place  $P_c$  qui contient le marquage supplémentaire nécessaire pour satisfaire l'égalité. Elle garantit que la somme des marques  $m_i$  et  $m_j$  dans les places du réseau de procédé reste toujours inférieure ou égale à 1. Elle respecte donc la spécification. La place qui maintient la contrainte appartient au RdP du contrôleur.

La structure du réseau de contrôleur sera calculée en observant que l'introduction de la variable  $m_s$  introduit un invariant de place (p-invariant). Puisque on a ajouté une nouvelle place ( $P_C$ ) au réseau, alors la matrice d'incidence  $W_R$  du système contrôlé globale est la matrice originale  $W_c$  ( $m \times n$ ) augmentée d'une ligne correspondant à la place introduite  $P_C$ . Cette nouvelle ligne appartient à la matrice d'incidence du contrôleur notée  $W_c$ . Le problème peut être situé en générale comme suit [7]:

Toutes les contraintes peuvent être groupées et écrites sous forme matricielle :

$$L \cdot m_p \leq b$$

Où  $m_p$  est le vecteur de marquage modélisant le procédé,  $L$  est une matrice ( $n_c \times n$ ),  $b$  est un vecteur ( $n_c \times 1$ ) et  $n_c$  est le nombre de contraintes.

De la même manière toutes les équations de P-invariants générés après l'introduction de la variable  $m_s$  peuvent être groupées sous forme matricielle :

$$L \cdot m_S + m_C = b$$

Où  $m_C$  est le vecteur ( $n_C \times 1$ ) qui représente le marquage des places du contrôleur.

L'équation matricielle suivante est l'équation P-invariant de tous les invariants définis par

$$l'equation\ précédente : X^T \cdot W = [L \quad I] \begin{bmatrix} W_R \\ W_C \end{bmatrix} = 0$$

$$L \cdot W_R + W_C = 0$$

$$W_C = -L \cdot W_R$$

Où  $I$  est la matrice identité ( $n_C \times n_C$ ) puisque les coefficients de la variable  $m_S$  dans les contraintes sont égaux à 1.

La matrice  $W_C$  contient les arcs qui connectent les places du contrôleur aux transitions du réseau du procédé.

Le marquage initial du réseau contrôleur doit être calculé d'après l'équation des P-invariants

$$L \cdot m_p + m_c = b:$$

$$\text{On a: } L \cdot m_{p0} + m_{c0} = b \text{ d'ou}$$

$$m_{c0} = b - L \cdot m_{p0}$$

### Exemple3.1

La figure suivante représente un modèle RdP avec des places à capacité fini

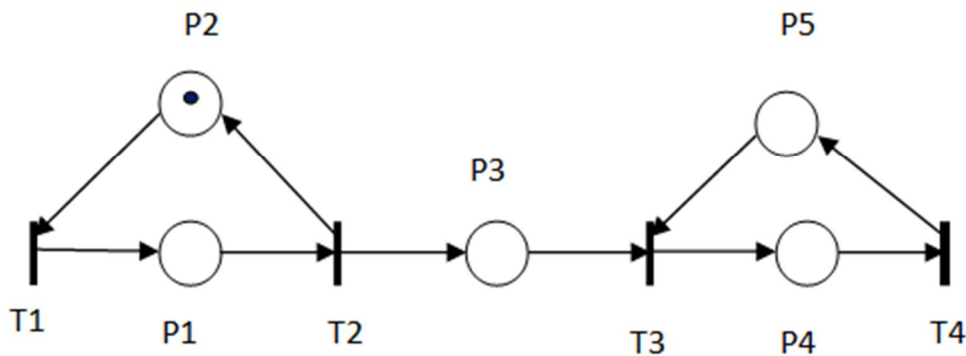


Figure III.2 : Réseau de système à superviser

$$\text{La matrice d'incidence de se réseau est } W_R = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Son marquage initial est } m_{p0} = \begin{bmatrix} m1 \\ m2 \\ m3 \\ m4 \\ m5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

L'objectif est de contrôler ce réseau afin que le marquage de la place P3 ne dépasse pas 3, c'est-à-dire, on va appliquer la contrainte :  $m_3 \leq 3$ .  $L = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0]$ ,  $b = 3$

On introduit la variable  $m_s$  est l'inégalité devient une égalité :  $m_3 + m_s = 3$

Cette équation représente l'invariant  $X = [0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1]^T$

La matrice d'incidence de contrôleur est :

$$W_c = -L \cdot W_p = - \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{Donc } W_c = [0 \ -1 \ 1 \ 0]$$

$$\text{Le marquage initial de contrôleur } m_{c0} = 3 - L \cdot m_0 = 3$$

La structure du réseau contrôlé est décrite par la matrice d'incidence suivante :

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

$$\text{Tandis que son marquage initial est } m_0 = \begin{bmatrix} m_{p0} \\ m_{c0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 3 \end{bmatrix}$$

Le réseau de petri du système contrôlé est donné par la figure 3.3 suivante :

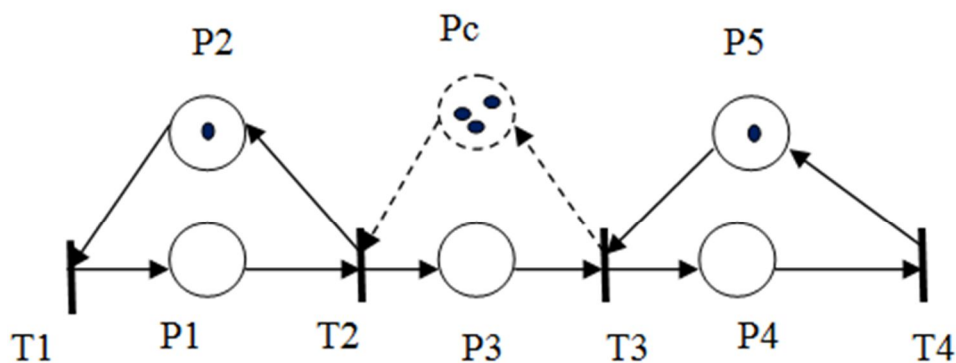


Figure III.3 : Réseau de système supervisé

#### IV.4. Supervision en présence de transitions incontrôlables

L'approche développée dans cette section, propose une technique de Synthèse de Contrôle (SdC) par supervision destinée aux réseaux de Petri. Dans ce cas on suppose que l'ensemble des transitions est partitionné en deux sous-ensembles  $T=T_c \cup T_u$ : Le premier est l'ensemble des transitions contrôlables  $T_c$  (représenté par des rectangles), le second est l'ensemble des transitions incontrôlables  $T_u$  (représenté par une ligne).

Le superviseur peut empêcher le franchissement d'une transition contrôlable quand il faut, par contre il est impossible d'empêcher le franchissement d'une transition incontrôlable. Soit  $W_{CU}$  la sous-matrice d'incidence représentant la partie incontrôlable, elle contient les colonnes de  $W_C$  qui correspondent aux transitions incontrôlables. Le contrôleur peut violer les contraintes si  $W_{CU}$  contient au moins un élément strictement positif, c'est-à-dire, s'il y a des arcs partant de la place de contrôle vers une transition incontrôlable. La matrice d'incidence  $W_{RC}$  et les différentes sous-matrices déduites sont présentées dans la figure suivante [6] :

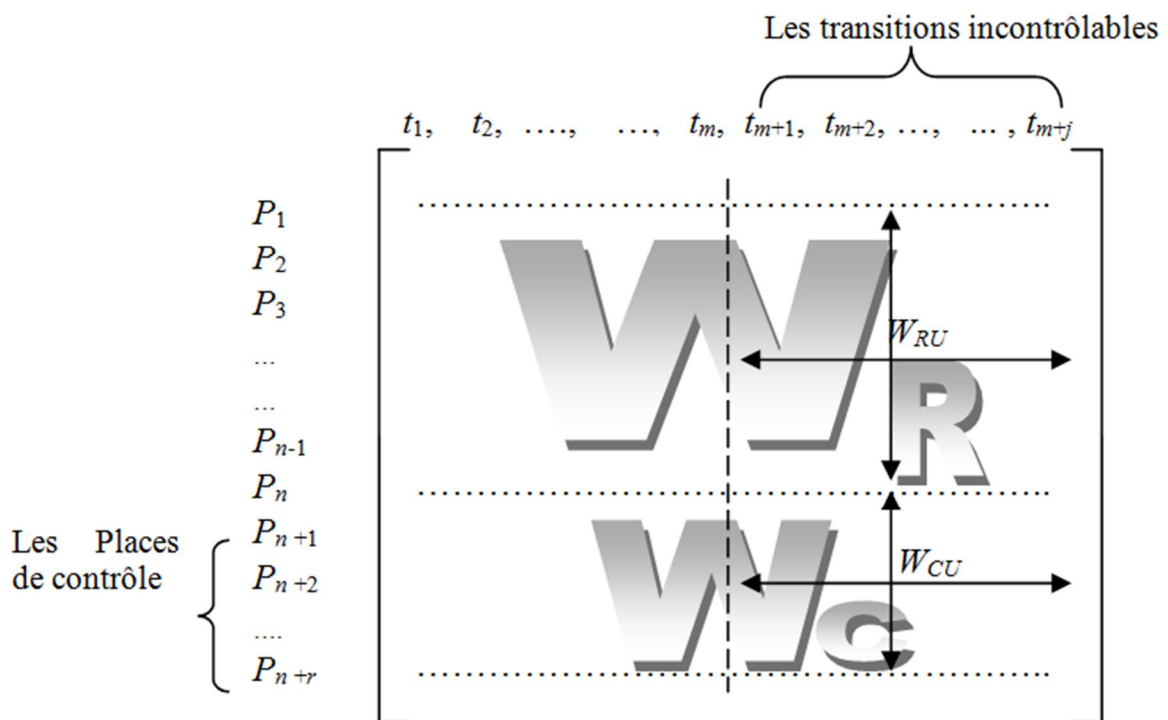


Figure III.4: Matrice d'incidence  $W_{RC}$  et les ensembles de sous matrices

Si  $W_{CU}$  contient des valeurs positives, les contraintes ne sont pas satisfaites. Pour résoudre ce problème, une méthode intuitive consiste à remonter les branches jusqu'à trouver une transition contrôlable qui soit en aval de la place de contrôle. Cette idée est présentée dans (Yamalidou et al. 1996). Mais cette méthode n'est pas toujours applicable. Moody dans (Moody et al. 2000) a présenté une méthode pour résoudre ce problème. Dans cette méthode les auteurs modifient les contraintes  $L$  pour que  $W_{CU}$  ne contienne pas des valeurs positives. Son principal inconvénient est qu'elle ne donne pas en général la solution optimale [6].

**Exemple 3.2**

Considérons les réseaux de pétri de la (figure III.5). Soit la contrainte sur le marquage suivant :

$M(l, K) = \{ m \in \mathbb{N}^m \mid m(p_3) \leq 1 \}$ . La place de contrôle  $p_c$  ne satisfait pas la condition de contrôlabilité structurelle car il existe un arc (en discontinu) de  $p_c$  vers la transition non contrôlable  $t_4$ .

Dans ce qui suit, les transitions présentés par des rectangles représentent les transitions contrôlables, et celles en un trait représentent les transitions non contrôlables

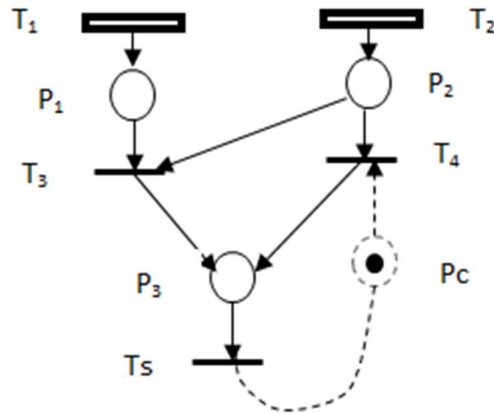


Figure III.5 : Réseau de pétri avec transitions non contrôlables

Le système synthétisé et supervisé qui satisfait les spécifications correspond à cet exemple est le suivant :

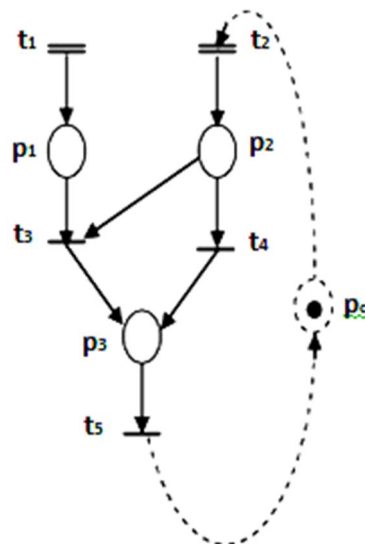


Figure III.6 : Réseau en boucle fermée

La transition  $t_2$  contrôle le franchissement de  $t_3$  et  $t_4$ , alors que  $t_1$  contrôle seulement le franchissement de  $t_3$ , d'où si  $p_1$  est incluse dans la contrainte transformée, cela implique nécessairement que  $p_2$  est incluse aussi. Les deux solutions possibles sont :

$$M(l^1, k^1) = \{m \in \mathbb{N}^m \mid m(p_2) + m(p_3) \leq 1\}.$$

Ou

$$M(l^2, k^2) = \{m \in \mathbb{N}^m \mid m(p_1) + m(p_2) + m(p_3) \leq 1\}.$$

Remarquons que  $M(l^2, k^2) \in M(l^1, k^1)$  d'où  $M(l^1, k^1)$  est la moins restrictive donc la solution optimale.

Si  $M(l^1, k^1)$  et  $M(l^2, k^2)$  sont incomparables, on peut choisir l'une des deux solutions. Cependant, si d'autres spécifications de contrôle sont présentes telles que la condition de vivacité par exemple, l'un des deux superviseurs est préférable que l'autre pour avoir un contrôle optimal.

## V. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons utilisé l'approche de Ramadge et Wonham qui s'intéresse à l'existence et la synthèse de superviseur le plus permissive pour les SED. Ce qui permet de construire un contrôleur capable de restreindre le fonctionnement d'un procédé donné, de telle manière qu'il respecte à tout moment le cahier des charges imposé. Elle n'est pourtant pas définitivement la meilleure méthode possible, notamment à cause de l'optimalité qui n'est pas toujours garantie. Dans le chapitre qui suit nous allons appliquer cette méthode pour notre système.

## **I. Introduction**

De nombreux systèmes peuvent être modélisés comme des systèmes à événements discrets (SED) : les systèmes manufacturiers, les systèmes de transport, etc. La théorie du contrôle par supervision (ou théorie RW), basée sur l'utilisation des automates à états et des langages formels, a été introduite par Ramadge et Wonham, pour synthétiser des lois de commande pour les SED.

Notre objectif dans ce chapitre est de proposer un modèle réseau de Petri globale modélisant notre atelier. On va aussi traduire les spécifications textuelles en contraintes linéaire exprimé sous forme d'inégalité. Par la suite va calculer un contrôleur, en utilisant la méthode des invariants de marquage.

## **II. Modélisation de l'atelier par RdP**

### **II.1. Synoptique générale de l'atelier**

Le système de production est composé des machines de différentes types, et un nombre important de tables et aussi des cabines pour les opérateurs. Comme nous l'avons déjà vu au chapitre 2 mais d'une façon plus détaillé.

La figure IV.1 (page 49) représente la synoptique générale de notre atelier.

### **II.2. Réseau de Petri modélisant l'atelier**

Le réseau de Petri globale modélisant notre système de production est donné par la figure IV.2 (page 50)





Nom de Place	Signification	Numéro de la place	Signification
P <sub>1</sub>	Formage de tube métallique	P <sub>20</sub>	Disponibilité de la machine
P <sub>2</sub>	Tube à soudé	P <sub>21</sub>	Tube déclassé
P <sub>3</sub>	Coupage de tube	P <sub>22</sub>	Table avant test ultra-son
P <sub>4</sub>	Table intermédiaire	P <sub>23</sub>	Machine ultra-son
P <sub>5</sub>	La capacité de la machine SP1200	P <sub>24</sub>	Disponibilité de la machine
P <sub>6</sub>	Machine à soufflage	P <sub>25</sub>	Radiographie
P <sub>7</sub>	Présence de l'opérateur	P <sub>26</sub>	Disponibilité de radiographie
P <sub>8</sub>	Disponibilité de l'outil	P <sub>27</sub>	Table pour peser les tubes
P <sub>9</sub>	Table intermédiaire	P <sub>28</sub>	Zone de réparation
P <sub>10</sub>	Table de test visuel	P <sub>29</sub>	Opération de chutage
P <sub>11</sub>	Table de stockage des tubes bon	P <sub>30</sub>	Présence de l'opérateur
P <sub>12</sub>	Machine à moulage	P <sub>31</sub>	Disponibilité de l'outil
P <sub>13</sub>	Présence de l'opérateur	P <sub>32</sub>	Opération de soudage
P <sub>14</sub>	Disponibilité de l'outil	P <sub>33</sub>	Présence de l'opérateur
P <sub>15</sub>	Table avant chanfreinage	P <sub>34</sub>	Disponibilité de l'outil
P <sub>16</sub>	Machine chanfreineuse	P <sub>35</sub>	Tube à réparer
P <sub>17</sub>	Disponibilité de la machine	P <sub>36</sub>	Tube avec défaut après test hydro-statique
P <sub>18</sub>	Table avant test hydro-statique	P <sub>37</sub>	Tube avec défaut après test ultra-son
P <sub>19</sub>	Machine hydro-statique	P <sub>38</sub>	Produit fini

Tableau IV.1 : liste des places (états) de modèle Rdp

Evénement	Signification	Evénement	Signification
T <sub>1</sub>	Entrée de la bobine D'acier et de formage	T <sub>15</sub>	Début de test ultra-son
T <sub>2</sub>	Fin de formage et début de soudage	T <sub>16</sub>	Fin de test ultra-son
T <sub>3</sub>	Fin de soudage et début de coupage	T <sub>17</sub>	Entré de tube dans la cabine RX
T <sub>4</sub>	Coupage de tube	T <sub>18</sub>	Fin de test RX
T <sub>5</sub>	Soufflage de tube	T <sub>19</sub>	Déclassement de tube
T <sub>6</sub>	Fin de soufflage	T <sub>20</sub>	Entré de tube dans la zone de réparation
T <sub>7</sub>	Entrée de tube dans la zone	T <sub>21</sub>	Tube à rébuté

	De test visuel		
T <sub>8</sub>	Tube bon	T <sub>22</sub>	Début de chute
T <sub>9</sub>	Moulage des extrémités	T <sub>23</sub>	Fin de chute
T <sub>10</sub>	Fin de moulage	T <sub>24</sub>	Début de soudage manuel
T <sub>11</sub>	Début de chanfreinage	T <sub>25</sub>	Fin de soudage
T <sub>12</sub>	Fin de chanfreinage	T <sub>26</sub>	Entrée de la zone de réparation après le test ultrason
T <sub>13</sub>	Début de test hydro-statique	T <sub>27</sub>	Entrée dans la zone de réparation après le test hydrostatique
T <sub>14</sub>	Fin de test hydro-statique	T <sub>28</sub>	Entrée de tube dans la zone de réparation après les deux tests

Tableau IV.2 : la liste des transitions de modèle Rdp

### III. Les spécifications (les contraintes)

Les spécifications imposées au système concernent les capacités des stocks intermédiaires (tables), qui ne doivent pas dépasser un certain nombre de tube. La commande synthétisée doit maintenir les stocks intermédiaires à des niveaux de tel sorte est ce que les contraintes soient satisfaites. Ceci va permettre de régler le problème d'encombrement rencontré dans la gestion de ce système.

Le modèle réseau de Petri de processus contient des transitions contrôlables et des transitions non contrôlables. Il faut donc calculer dans un premier temps le superviseur sans tenir compte du non contrôlabilité des transitions. Par la suite, il faut adapter les superviseurs pour que la condition de contrôlabilité soit satisfaite.

#### III.1. Les différentes contraintes imposées pour notre procédé (système)

On considère les spécifications de fonctionnement suivantes de notre système de production. Dans un premier temps on désire que les stocks (tables) correspondants aux places (P<sub>4</sub>, P<sub>9</sub>, P<sub>28</sub>) ne dépassent pas 13 tubes. Ceci s'exprime par les inégalités suivantes :

$$m_4(t) \leq 13 \quad (4.1)$$

$$m_9(t) \leq 13 \quad (4.2)$$

$$m_{28}(t) \leq 13 \quad (4.3)$$

On veut aussi que le stock correspond à la place P<sub>11</sub> ne dépasse pas 30 tubes, ce qu'est exprimé par l'inégalité suivante :

$$m_{11}(t) \leq 30 \quad (4.4)$$

Le stock correspond à la place P<sub>15</sub> est une petite table limité a 5 tubes seulement. Ce qui est exprimé par l'inégalité suivante :

$$m_{15}(t) \leq 5 \quad (4.5)$$

On désire que les stocks correspondent aux places (P<sub>18</sub> et P<sub>22</sub>) ne dépassent pas 10 tubes. Ce qu'on va exprimer par les deux inégalités suivantes :

$$m_{18}(t) \leq 10 \quad (4.6)$$

$$m_{22}(t) \leq 10 \quad (4.7)$$

Finalement on désire que le stock correspond à la place  $P_{27}$  ne dépasse pas 29 tubes. Ce qui est traduit par l'inégalité suivante :

$$m_{27}(t) \leq 29 \quad (4.8)$$

#### IV. Calcul de superviseur

La méthode des invariants impose un ensemble de contraintes linéaires sur le marquage du système. Ces contraintes sont exprimées sous forme d'inégalité. Sous cette hypothèse, la méthode pourrait toutefois permettre de calculer un contrôleur optimal même dans l'éventualité du procédé qui n'est pas complètement contrôlable [9].

Après avoir déterminé les contraintes linéaires imposées pour notre système, on va calculer un superviseur pour chaque contrainte :

On a dans (4.1) la contrainte  $m_4(t) \leq 13$

Pour satisfaire cette contrainte on va ajouter une place de contrôle  $P_{c1}$  a notre modèle, ce qui conduit à la synthèse du superviseur suivante :

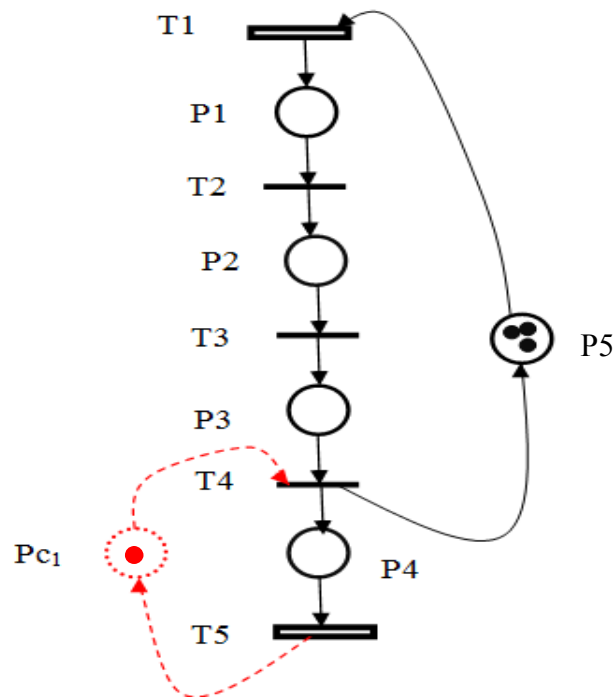


Figure IV.3 : calcul du superviseur pour la première contrainte

La figure 4.3 représente le modèle d'un système contrôlé. Dans ce modèle, la place de contrôle  $P_{c1}$  assure une capacité de la place P4 ne dépassant pas 13 jetons à la fois.

Le problème c'est que cette place est reliée à une transition T4 non contrôlable. Dans ce cas le superviseur n'est pas réalisable puisqu'il ne satisfait pas les conditions de contrôlabilité, la transformation de type invariant de marquage conduit a un superviseur permissif. Une solution consiste ici à remonter la branche à partir de la transition d'entrée T4 de la place P4 jusqu'à la transition T1 qui est contrôlable. La place de superviseur va être reliée à la

transition contrôlable avec un marquage initiale égale à  $(b - Lm) - m_{0\delta}$ , ou  $\delta$  est le chemin entre la transition non contrôlable jusqu'à la transition contrôlable.

Le système contrôlé final est donné dans la figure 4.4 correspond au superviseur optimal, ce qui veut dire un superviseur qui garantit la contrainte suivante :

$$m_4(t) + m_3(t) + m_2(t) + m_1(t) \leq 13$$

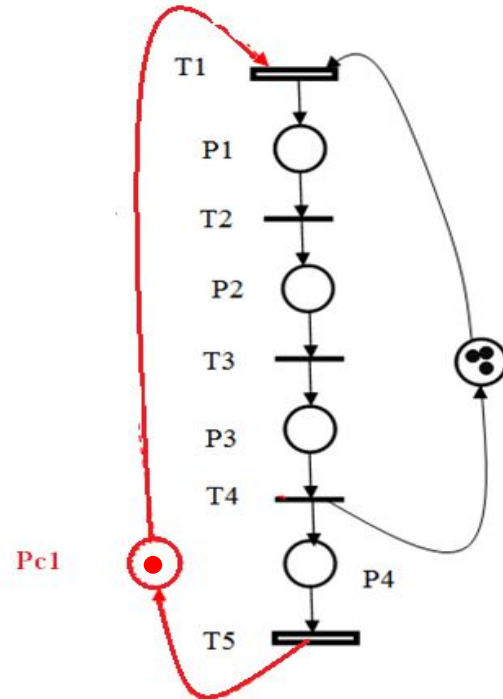


Figure 4.4 : Système supervisé final

Dans l'inégalité (4.2) on a :  $m_9(t) \leq 13$  ; Cette contrainte conduit à une synthèse du superviseur de la figure IV.5 qui suit

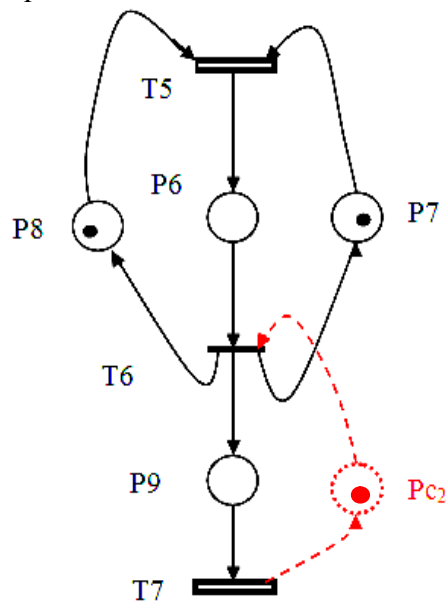


Figure IV.5 : le système avec une place de contrôle

Ce superviseur n'est pas réalisable car il ne satisfait pas les conditions de contrôlabilités. La transformation par invariant de marquage nous conduit au superviseur suivant :

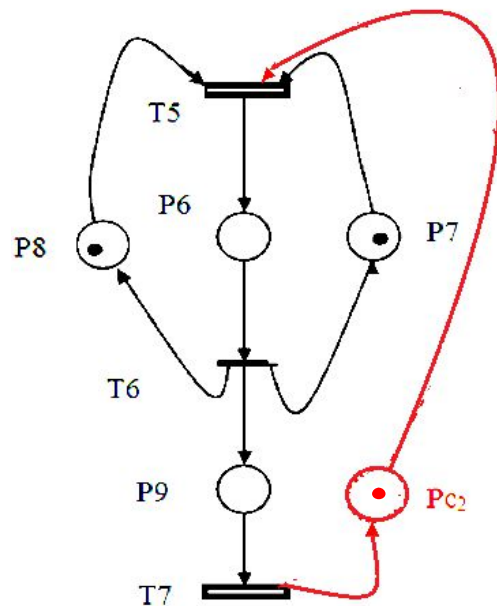


Figure IV.6 : le système supervisé

Ce qui veut dire qu'il faut garantir la contrainte suivante pour satisfaire les conditions de contrôlabilité :

$$m_9(t) + m_8(t) + m_7(t) + m_6(t) \leq 13$$

L'inégalité (4.3) ne nécessite pas une transformation car la place de contrôle Pc<sub>8</sub> ne possède pas un arc sortant vers les transitions non contrôlables.

Pour satisfaire la contrainte (4), tel que le stock ne dépasse pas 30 tubes à la fois on ajoute une place de contrôle, ce qui conduit au superviseur suivant :

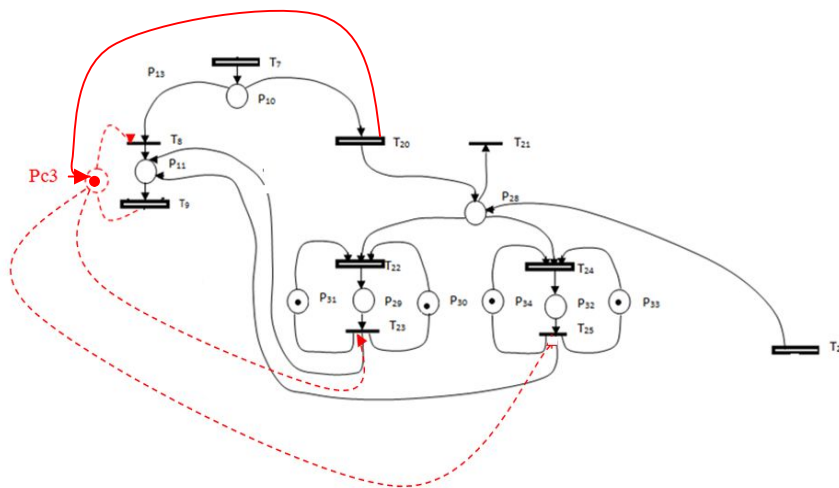


Figure : 4.7 : Le système avec une place de contrôle

De la même manière que par avons on va remonter le chemin jusqu'à la transition contrôlable T5 qui est en aval de la place de contrôle, on vérifiant la contrainte :

$$m_{11}(t) + m_{10}(t) + m_{29}(t) + m_{32}(t) \leq 30$$

Ce qui nous donne le superviseur suivant :

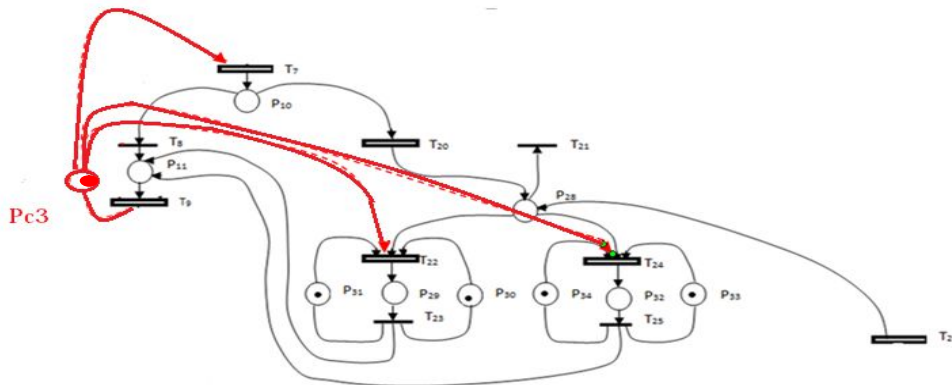


Figure IV.8 : Le système supervisé

Dans l'inégalité (5) on déduit que le stock correspond à la place P15 ne dépasse pas 10 tubes à la fois, donc on va introduire une place de contrôle Pc4 comme le montre la figure suivante :

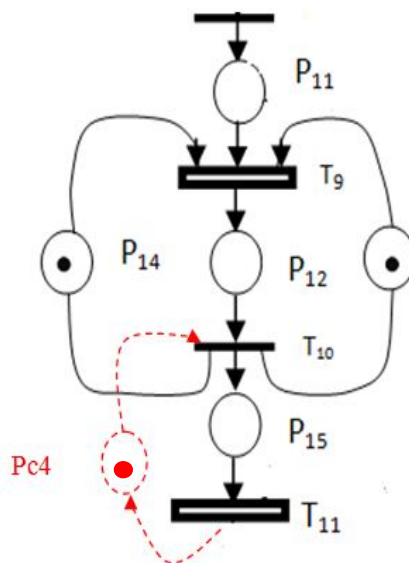


Figure IV.9 : le système avec une place de contrôle

On remarque que la place de contrôle Pc4 est relié à une transition non contrôlable T10 ce qui implique que le superviseur n'est pas réalisable donc on va calculer un superviseur qui doit satisfaire les contraintes imposé. La figure suivante montre le superviseur Après transformation.

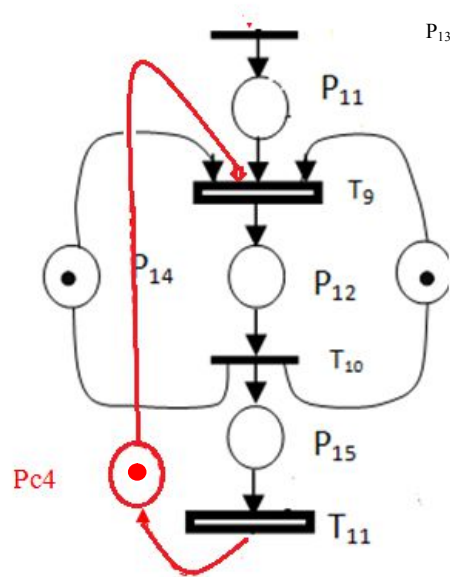


Figure IV.10 : Le système contrôlé

Il faut que ce superviseur respecte la contrainte suivante :

$$M_{15}(t) + m_{12}(t) + m_{13}(t) + m_{14}(t) \leq 5 \text{ pour qu'il soit réalisable.}$$

Par rapport à la contrainte (6) on suppose que le stock correspondant à la place P18 ne dépasse pas 10 tubes à la fois, donc il faut introduire une place de contrôle Pc5. Ce qui est illustré dans la figure suivante

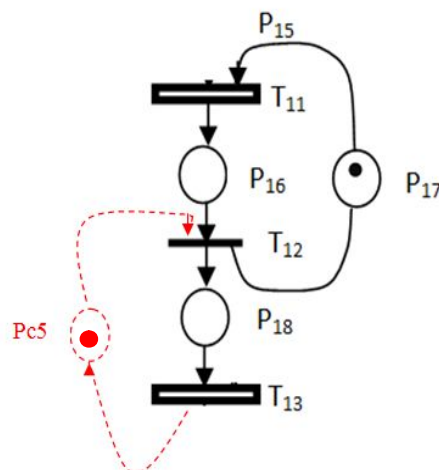


Figure IV.11 : le système avec une place de contrôle

La place de contrôle est reliée à une transition non contrôlable, ce que veut dire que le superviseur n'est pas réalisable. Alors, il nous faut un superviseur qui respecte les conditions de contrôlabilités. Ce qui est indiqué dans la figure suivante :

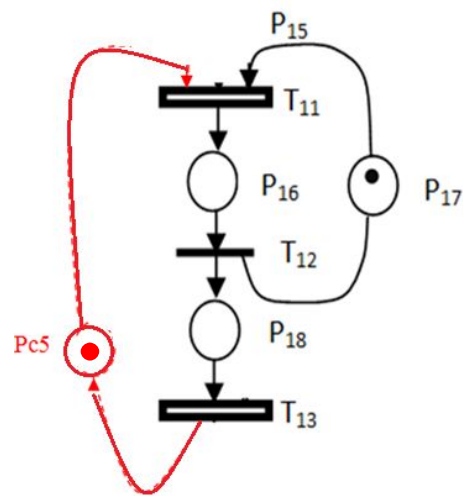


Figure IV.12 : Le système contrôlé.

L'inégalité (7) implique que le stock correspondant à la place P22 ne dépasse pas 10 tubes à la fois. Donc on propose d'ajouter une place de contrôle à ce système. La figure suivante illustre ce superviseur.

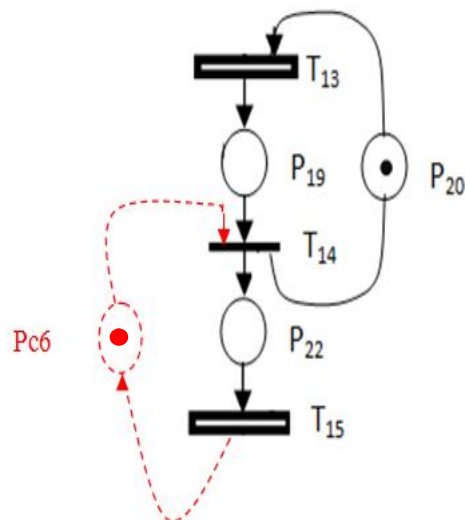


Figure IV.13 : le système avec une place de contrôle

La place de contrôle Pc6 est reliée à une transition non contrôlable. Ce qui rend le superviseur non réalisable (il ne satisfait pas les conditions de contrôlabilités). Donc le superviseur devient comme suit

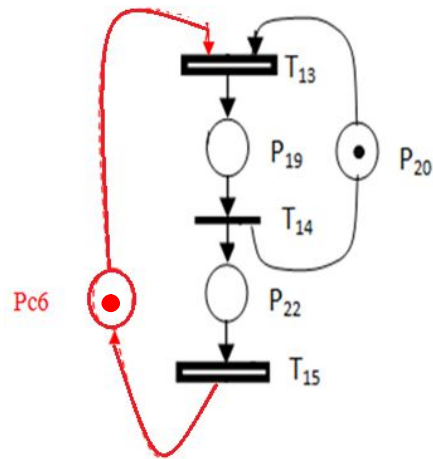


Figure 4.14 : Le système supervisé

Ce superviseur respect la contrainte suivante :  $m_{22}(t) + m_{19}(t) + m_{20}(t) \leq 10$

Pour la dernière inégalité, le stock correspond à la place P27 ne dépasse pas 29 tubes à la fois. Donc comme les autres superviseurs on ajoute une place de contrôle Pc7 pour le système. Comme la figure suivante l'indique

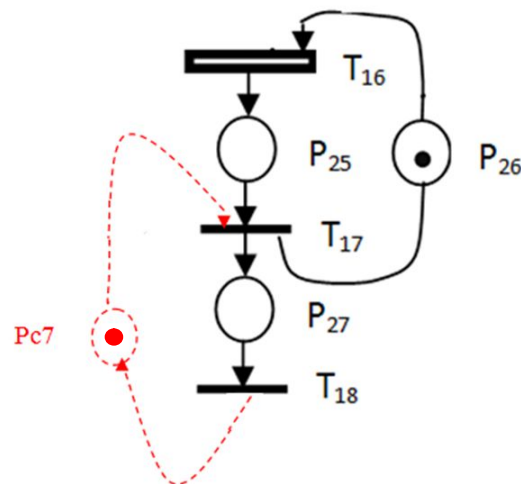


Figure IV.15 : Le système avec une place de contrôle

La place de contrôle est reliée à une transition non contrôlable. Ce qui rend le superviseur non réalisable (il ne satisfait pas les conditions de contrôlabilités). Donc le superviseur devient comme suit

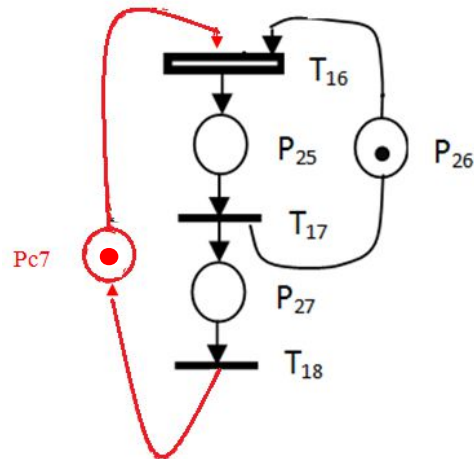


Figure IV.16: Le système supervisé

Le système contrôlé final donné dans la figure 4.16 correspond au superviseur optimal, ce qui veut dire un superviseur qui garantit la contrainte suivante :

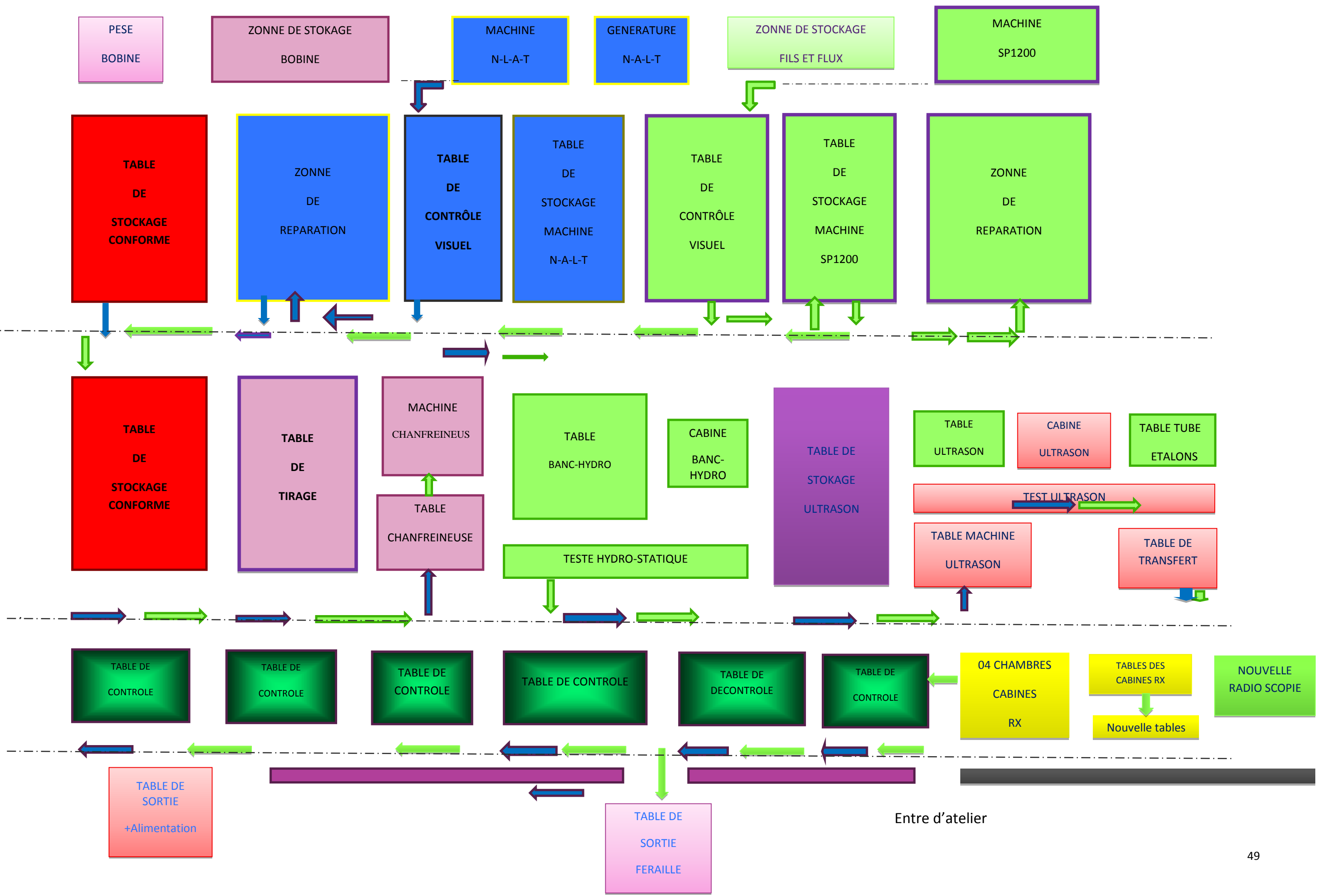
$$m_{27}(t) + m_{25}(t) + m_{26}(t) \leq 29$$

#### V. Le modèle RdP globale supervisé de notre atelier



**VI. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons mis en œuvre la méthode de synthèse supervision basée sur des invariants de marquage, Cette méthode permet d'obtenir des places de supervision qui vont garantir la spécification désirées. L'optimalité est pas toute fois garantie à cause de la présence de transitions non contrôlables.



Entre d'atelier

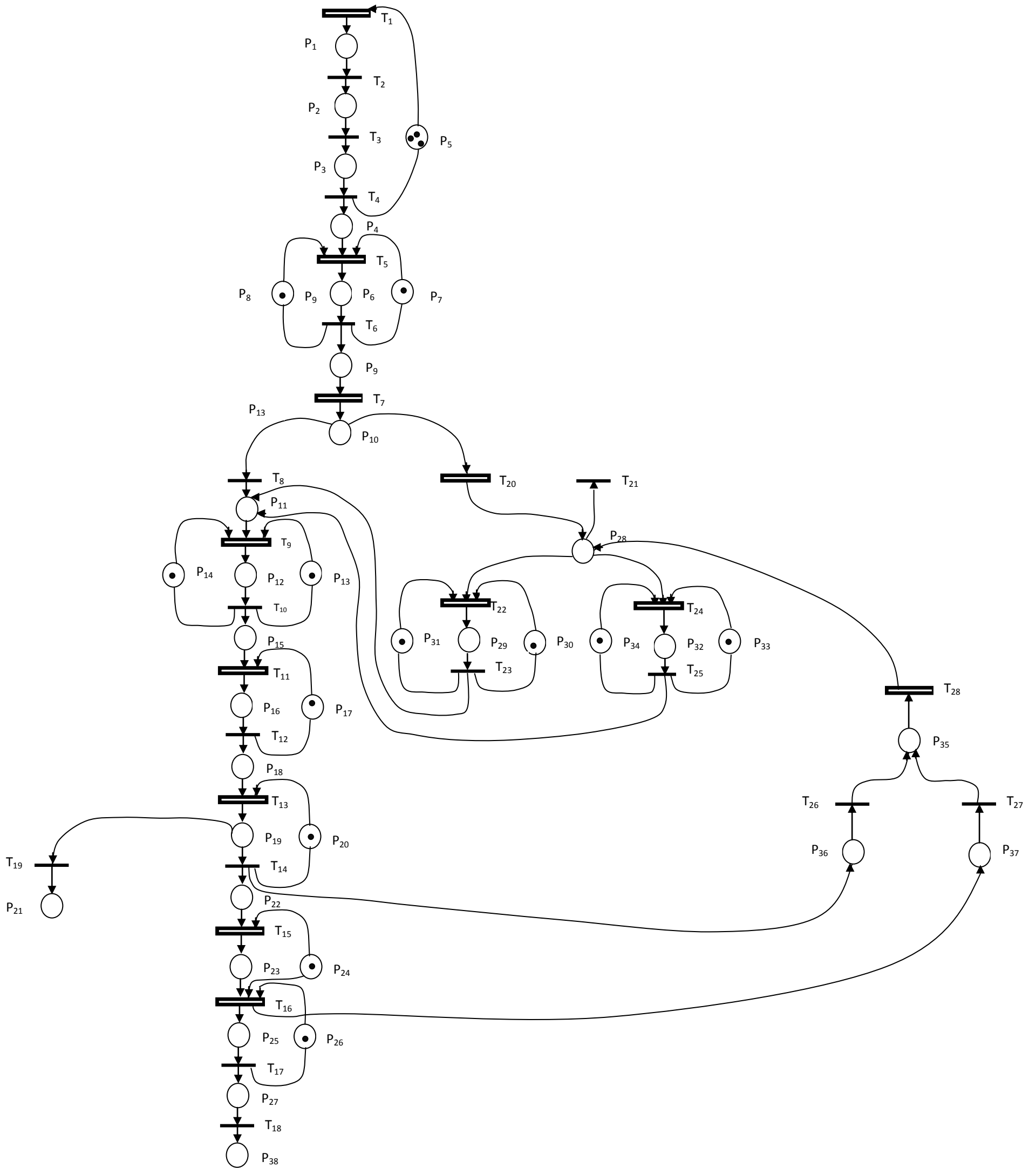


Figure IV. 2 : Modèle RdP de l'atelier ANABIB

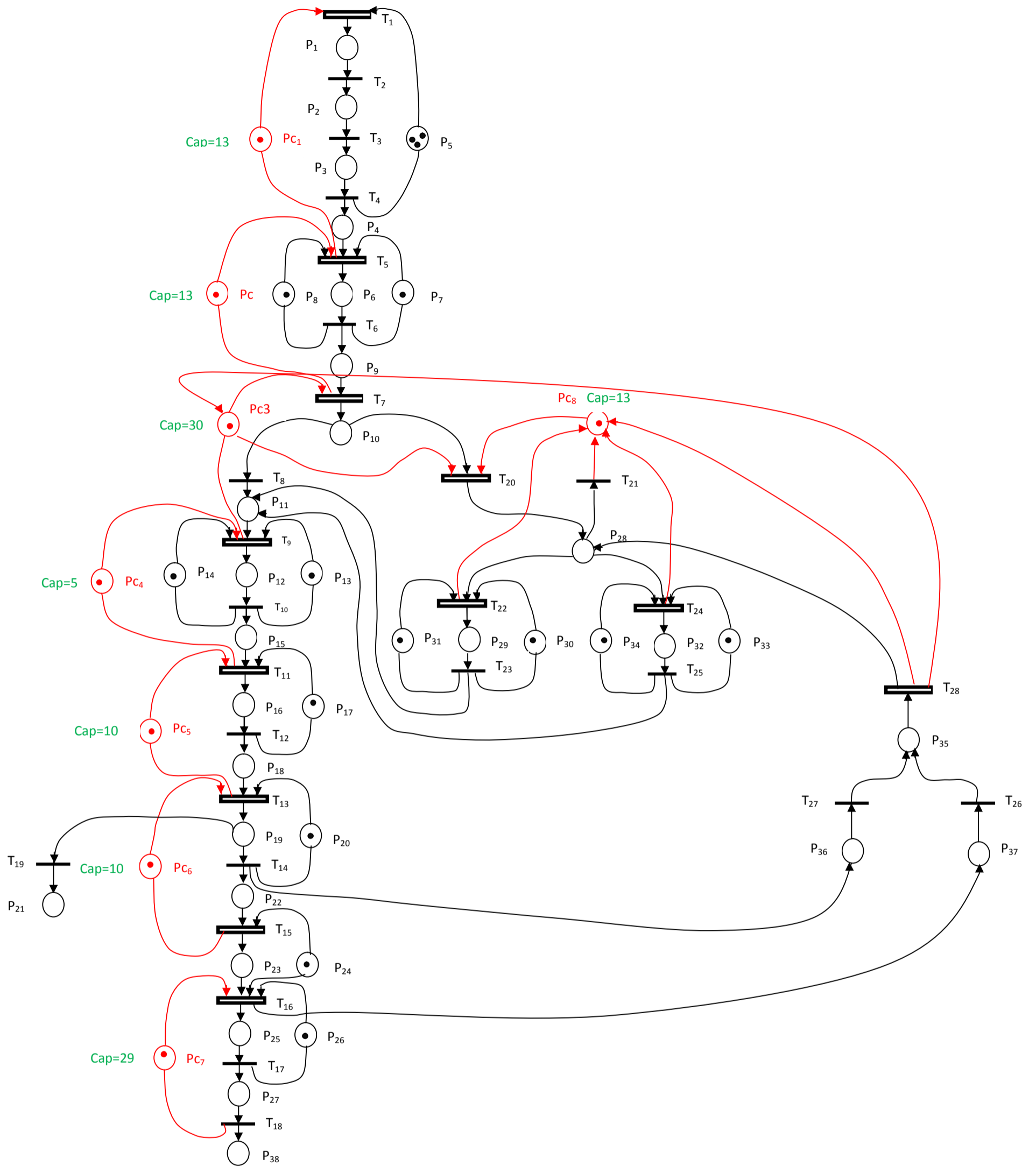


Figure IV.16 : Modèle globale supervisé d'atelier de production des tubes d'ANABIB

**Remarque**

Après avoir synthétisé et supervisé le modèle RdP de notre atelier, on a obtenu un superviseur réalisable dans le domaine pratique.

## Conclusion général

---

Dans ce travail, nous avons proposé une solution, facile à mettre en œuvre, qui permet de résoudre les problèmes rencontrés dans la chaîne de production de tubes métalliques de la société ANABIB. Cette solution s'appuie sur une modélisation par les réseaux de Petri de la chaîne de production. On a utilisé l'approche des invariant de marquage proposée par Yamalidou (Yamalidou et al, 1996) pour la synthèse de contrôleurs qui permettent la satisfaction des contraintes imposées sur les stocks intermédiaires de l'atelier. Mais en raison de la présence de transitions non contrôlables, les superviseurs synthétisés peuvent être non optimales (non maximalement permissifs).

Nous avons alors été à la complicité apportée par le nombre des places de contrôles qui peuvent être très grandes. Pour résoudre ces problèmes, nous nous sommes inspirés de la théorie introduite par Giua, nous avons l'ensemble des spécifications imposées aux systèmes en un ensemble de contraintes linéaires. Ensuite, nous avons construit un contrôleur à partir des contraintes simplifiées en utilisant la méthode proposée par Yamalidou.

Dans le premier chapitre, nous avons donné quelques définitions sur les réseaux de Petri qui nous ont permis de nous familiariser avec l'outil de modélisation utilisé.

Au deuxième chapitre, nous avons donné une description générale de l'atelier de production étudié. Ainsi, le processus de fabrication des tubes métalliques est expliqué étape par étape. À la fin du chapitre, le problème rencontré dans l'atelier a été posé.

Dans le troisième chapitre, nous étudions des méthodes de supervision établies. Un accent particulier a été mis sur la méthode des invariant de marquage utilisée dans ce mémoire.

Au quatrième chapitre, nous avons proposé un modèle pour la chaîne de production des tubes métalliques de ANABIB. Les spécifications imposées au système sont données sous forme de contraintes sur le marquage. Les contrôleurs sont par la suite calculés sur la base de ces contraintes.

Comme perspectives, nous proposons les travaux futurs suivants :

1. Implanter le superviseur obtenu pratiquement dans un API.
2. Étudier le modèle RdP en tenant compte des temporisations.
3. Transformer le modèle RdP en Grafset et faire une simulation.

## Bibliographie

---

- [1] **David RENÉ et Hassane ALLA** : "Du Grafset aux réseaux de petri", Paris : édition Hermès, ISBN 2-86601-322-5, Avril 1997.
- [2] **N.BENNIS**, **cours** du professeur de l'enseignement supérieur de l'ENSET (Maroc) : "Les Rdp, théorie, propriété et application " acquis sur le site officiel : [www.specialautum.net](http://www.specialautum.net).
- [3] **K.LABADI** : "Contribution à la modélisation et à l'évaluation de performances des systèmes logistiques à l'aide d'un nouveau modèle de réseaux de Petri stochastiques". Engineering Sciences. Université de Technologie de Troyes, France, 2005.
- [4] **R.KARA** : Mémoire de Magistère en Automatique: " Modélisation, Analyse et Commande des Système Flexible de Production par Réseaux de Petri ", Département Automatique, UMMTO, 2001.
- [5] **G.SCORLETTI et G.BINET** : Maitres de conférences à l'université de Caen : "cours sur les Rdp", France 2006.
- [6] **A.DIDEBAN**: Thèse de doctorat en automatique : "Synthèse de contrôleurs discrets par simplification de contraintes et de conditions", Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2007.
- [7] **H.HAROUCHE** : thèse de magistère en Automatique: "synthèse de superviseur basée sur les réseaux de petri", UMMTO, 2011.
- [8] **M. NOURELFATH** : 3e Conférence Francophone de Modélisation et Simulation: "Conception, Analyse et Gestion des Systèmes Industriels ", Université du Québec 2001.
- [9] **B.KATTAN** : thèse de doctorat en Automatique : " Synthèse structurelle d'un contrôleur basée sur le Grafset", Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2004.