



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

**Département**  
Maintenance en Instrumentation

## MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière :** Génien Industriel

**Spécialité :** Génien Industriel

## Thème

*Modélisation et conduit d'une armoire automatisée de dispensation de  
médicaments par synthèse de contrôleur inverse  
basé sur les réseaux de Pétri*

Présenté et soutenu publiquement par

Hocini Abdennour Redha  
Ferradji Abdelkader

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
BENFEKIR Abderrahim	MCB	Université d'Oran 2	Président
HACHEMI Khalid	Professeur	Université d'Oran 2	Encadreur
BENARBIA Taha	MCB	Université d'Oran 2	Examineur

Année 2018/2019

## ***Remerciements***

*Nous commençons par remercier dieu tout puissant pour nous avoir facilité la réalisation de ce travail.*

*Nous tenons à adresser notre plus sincère remerciements et toutes notre reconnaissances à notre encadreur Mr .HACHEMI Khalide, nous le remercier grandement que ce soit pour ces qualités scientifiques ou humaines, faisant toujours preuve de réflexion et de patience.*

*Nous remercions également les membres du jury Mr.BENFEKIR Abderrahim et Mr.BENARBIA Taha, qui nous avons fait l'honneur d'accepté, d'examiner et de juger notre travail.*

*Nous voudrions aussi remercier nos amis, nos collègues de l'université pour leurs gentillesse, leurs bonnes humeurs et pour leurs soutiens constants.*

*Nous remercions également nos amis de sig (Mascara) et el-Gantra (Biskra) pour leurs encouragements et leurs vitalités vitaminées.*

*Et enfin un grand merci à notre familles Hocini et Ferradji pour les quelles nous exprimons mes plus profondes et sincères gratitude.*

# Table des matieres

<b>Introduction Générale</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 : Systèmes automatisés de dispensation de médicaments</b>	<b>4</b>
1.1.Introduction.....	5
1.2.Que veut dire « une dispensation de médicaments » ?.....	5
1.3.Types de dispensation.....	6
1.3.1 Distribution globale.....	6
1.3.2 Distribution globalisée.....	7
1.3.3 Dispensation nominative, individuelle.....	7
1.4. L'automatisation des système de dispensation de médicaments.....	8
1.4.1 La délivrance automatisée des systèmes de dispensation.....	8
1.4.1.1 La dispensation centralisée (en PUI).....	8
1.4.1.2 La dispensation décentralisée (PUI locales).....	9
1.4.2 L'objectif de la solution automatisée.....	11
<b>Chapitre 2 : Armoires de dispensation de médicaments</b>	<b>12</b>
2.1. Introduction.....	13
2.2. Présentation du système des armoires automatisées .....	14
2.3. Les différents types d'armoires automatisées de dispensation de médicaments...15	
2.3.1. Armoire ARIANA.....	15
2.3.2. Armoire APOTEKA.....	16
2.3.3. Armoire ROWA.....	17
2.3.4. Armoire PYXIS.....	18
2.4. Les différents types de tiroirs inclus dans les armoires de médicaments.....	19
2.4.1. Les tiroirs de type Matrix.....	19
2.4.2. Les tiroirs de type Cubie et Mini-Tiroir.....	20
2.4.3. Les tiroirs de type Carroussel.....	20
2.5. Fonctionnement des armoires a tiroir.....	21
2.6. La problématique.....	22

<b>Chapitre 3 : Approche de la synthèse de contrôleur par la méthode des invariants</b>	<b>24</b>
3.1. Introduction.....	25
3.2. Système a Evénement Discrets (SED).....	25
3.3. Réseaux de Pétri (Rdp).....	26
3.3.1. Notions de base sur Rdp .....	26
3.3.2. Le marquage.....	27
3.3.3. Propriétés des réseaux de Pétri.....	29
3.3.4. Franchissement d'une transition.....	30
3.3.5. Ensembles des marquages accessibles.....	30
3.4. L'invariant de marquage et les réseaux de Pétri conservatifs.....	32
3.5. Synthèse de contrôleur.....	33
3.6. Le concept de la commande par supervision.....	34
3.6.1 Le schéma de supervision.....	34
3.6.2. Hypothèse.....	35
3.6.3. Contrôlabilité.....	35
3.7. Synthèse de contrôleur basée sur les Réseaux de Pétri par la méthode des invariants.....	36
<b>Chapitre4:Application de la synthèse de contrôleur inverse au problème d'affectation.</b>	<b>39</b>
4.1. Introduction.....	40
4.2. Modélisation de système par Rdp.....	40
4.3. Synthèse de contrôleur inverse.....	41
4.4.Application de contrôleur inverse.....	42
4.4.1.Application 1.....	46
4.4.2.Application 2.....	49
4.5. Exemple d'application (2 couples incompatibles).....	52
4.5.1.Application 1.....	53
4.5.2.Application 2.....	58
4.6.Remarque générale.....	61
<b>4.7.Généralisation</b>	<b>62</b>

## Table des figures

<b>Figure1.1.</b> <i>Circuit du médicament</i> .....	6
<b>Figure1.2.</b> <i>Exemple d'un système de dispensation combiné dans une unité de soin</i> ....	8
<b>Figure1.3.</b> <i>Dispensation centralisée</i> .....	9
<b>Figure1.4.</b> <i>Dispensation décentralisée</i> .....	10
<b>Figure2.1.</b> <i>Armoire à pharmacie sécurisée (APS)</i> .....	12
<b>Figure2.2.</b> <i>Armoire automatisée</i> .....	13
<b>Figure 2.3.</b> <i>Vue d'un tiroir d'une armoire automatisée</i> .....	14
<b>Figure2.4.</b> <i>Armoire ARIANA</i> .....	15
<b>Figure2.5.</b> <i>Armoire APOTEKA</i> .....	15
<b>Figure2.6.</b> <i>Rowa</i> .....	16
<b>Figure2.7.</b> <i>Rowa vue de l'intérieur</i> .....	16
<b>Figure2.8.</b> <i>RowaV-MAX</i> .....	17
<b>Figure2.9.</b> <i>Armoire PYXIS</i> .....	17
<b>Figure2.10.</b> <i>Infirmière utilisant le système PYXIS</i> .....	18
<b>Figure2.11.</b> <i>Tiroir de type matriciel (matrix)</i> .....	18
<b>Figure2.12.</b> <i>Tiroir type cubie / mini-tiroirs</i> .....	19
<b>Figure2.13.</b> <i>Tiroir type carroussel</i> .....	19
<b>Figure2.14.</b> <i>Principe de fonctionnement d'une armoire automatisée</i> .....	20
<b>Figure 3.1.</b> <i>Changement d'état par occurrence des évènements dans un SED</i> .....	24
<b>Figure3.2.</b> <i>Réseau de pétri marque</i> .....	26
<b>Figure3.3</b> <i>.Franchissement d'une transition</i> .....	29
<b>Figure3.4.</b> <i>Graphe de marquage du RdP de la fig3.2</i> .....	30
<b>Figure3.5.</b> <i>Modèle RdP d'une machine</i> .....	31
<b>Figure3.6.</b> <i>RdP conservatif</i> .....	32
<b>Figure 3.7.</b> <i>Le schéma de supervision</i> .....	33
<b>Figure3.8</b> <i>.Modèle Rdp</i> .....	35

<b>Figure3.9.</b> <i>Modèle Rdp en boucle fermé</i> .....	38
<b>Figure4.1.</b> <i>Configuration de l'armoire</i> .....	40
<b>Figure4.2.</b> <i>Modèle réseau de Pétri du problème d'affectation</i> .....	41
<b>Figure 4.3.</b> <i>Tiroir à 4 compartiments</i> .....	43
<b>Figure4.4.</b> <i>Modèle Rdp du procédé</i> .....	43
<b>Figure4.5.</b> <i>RdP du procédé contrôlé(directe)</i> .....	45
<b>Figure 4.6.</b> <i>RdP du procédé controlé inverse</i> .....	46
<b>Figure4.7.</b> <i>ModèleRdp de l'exemple1</i> .....	48
<b>Figure 4.8.</b> <i>Modèle Rdp de l'exemple 2</i> .....	50
<b>Figure4.9.</b> <i>Rdp de l'exemple 2 après le franchissement de séquence</i> .....	51
<b>Figure4.10.</b> <i>Modèle RdP de L'exemple</i> .....	52
<b>Figure.4.11.</b> <i>Modèle RdP du procédé inverse</i> .....	54
<b>Figure4.12.</b> <i>Rdp de l'exemple 2 contrôlé</i> .....	58
<b>Figure.4.13.</b> <i>RdP du procédé inverse modélisé</i> .....	62
<b>Figure.4.14.</b> <i>Ttiroir à 'k' compartiments</i> .....	63

## Liste des abréviations utilisées

PUI : Pharmacie à Usage Interne

IDE : Infirmier / Infirmière Diplômé d'Etat

US : Unité de Soins

AS : Aide-Soignant

DJIN : Dispensation Journalière Individuelle et Nomative

DDIN : Dispensation à Délivrance Individuelle et Nomative

DHIN : Dispensation Hebdomadaire Individuelle et Nomative

CH : Centre Hospitalier

ADA : Armoires de Distribution Automatisée

RdP : Réseaux de Pétri

SED : Système à Evénement Discret

# **Introduction générale**



## Introduction Générale

L'automatisation de la délivrance de médicaments en pharmacie vise à améliorer la qualité de service ainsi qu'à la sécurité des patients. Les technologies automatisées concernent plusieurs segments de la prise en charge médicamenteuse à la fois au sein de pharmacie à usage intérieur et dans les unités de soins en général. Les stockeurs ont pour but d'optimiser le volume de rangement mais aussi de réduire et optimiser le temps de préparation des commandes. L'augmentation constante des stocks à gérer et l'impérative sécurisation du circuit de médicaments poussent à introduire aussi de plus en plus ces systèmes automatisés de dispensation.

Une solution automatisée de la dispensation a pour but de limiter les pertes de temps pendant la distribution, minimiser les risques dû aux erreurs de dispensation, rentabiliser le travail du personnel et par la même augmenter la productivité.

Deux médicaments sont dit incompatibles ou similaires quand ils présentent un risque de confusion pour les infirmiers. Et il ne faudrait pas placer deux médicaments incompatibles dans deux compartiments proches ou voisins. Le système que nous étudions est sous forme d'une armoire mobile, qui contient plusieurs tiroirs, ces derniers sont subdivisés en plusieurs compartiments. Chaque compartiment peut contenir un seul type de médicament en plusieurs unités.

Notre travail consiste à organiser le placement des médicaments dans un tiroir afin de réduire les erreurs de dispensation. Effectivement confondre les noms des médicaments est une cause fréquente des erreurs médicamenteuses. Ces erreurs se produisent essentiellement en raison des similitudes entre les noms de marque (exemple Sumial et Luminal). Plusieurs techniques existent pour parer aux erreurs d'administration. On peut citer le recours aux lettres majuscules pour l'écriture des noms de médicaments, comme pour Epinephrine et Ephedrine ; on les écrit EPINEphrine et EpheDRINE pour marquer la différence. L'utilisation du code-barres pour identifier les médicaments constitue un autre moyen pour la prévention des erreurs d'administration. Pazour et al (2012) ont abordé le problème de la localisation de médicaments à l'intérieur des tiroirs dans le but de minimiser les erreurs humaines de sélection. Ils ont développé un modèle d'optimisation permettant de déterminer les meilleurs emplacements de stockage évitant de mettre deux médicaments ayant des points de similitude l'un à côté de l'autre. En 1996 Yamalidou et al proposent une méthode pour construire un contrôleur à partir des contraintes linéaires basée sur la théorie de supervision en modèle RdP. Notre contribution est de faire une approche basée sur la synthèse de contrôleur par les réseaux de pétri pour l'affectation de médicaments dans une armoire automatisée de dispensation de médicaments. L'armoire est composée de plusieurs tiroirs où chaque tiroir est subdivisé en compartiments pouvant recevoir chacun un type de médicament. Le problème consiste à affecter les compartiments aux différents médicaments existants, sachant qu'il existe des médicaments qu'il ne faut pas placer dans des compartiments voisins à cause du risque de confusion pouvant induire des erreurs de dispensation.

## Introduction Générale

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres. Dans le chapitre 1, on expliquera c'est quoi la dispensation de médicaments et l'automatisation de cette dernière et quel est le but de la solution automatisée. Dans le chapitre 2 on présentera différentes armoires de dispensation de médicaments ainsi que la problématique d'affectation qui en découle. Dans le chapitre 3 on verra ce qu'est un système à événements discret et on présentera un petit rappel sur les réseaux de pétri. Dans la suite on parlera de la commande sous supervision (synthèse de contrôleur) et Pour finir on discutera de la méthode des invariants de la synthèse de contrôleur basée sur les réseaux de Pétri. Dans le chapitre 4 on fera une exposition d'un modèle réseau de Pétri développé et on expliquera l'application de l'approche de synthèse de contrôleur au problème d'affectation. Puis on traitera des exemples d'application représentant des cas réels, via un programme sous Matlab qui vérifie s'il existe une solution possible d'affectation ou pas . Enfin on terminera notre mémoire par une conclusion générale sur notre travail et les perspectives qui en découlent.

## **Chapitre 1**

# **Systemes automatisés de dispensation de médicaments**

## 1.1 Introduction :

Un système automatisé de dispensation de médicament permet à dispenser les médicaments mais d'une façon complètement autonome, il est géré par un logiciel de gestion et les actions sont supervisées par un médecin ou un infirmier.

Dans ce chapitre on va expliquer d'abord c'est quoi « Dispenser un médicament », quels sont ses types et après on va s'intéresser aux systèmes automatisés et les buts de ces systèmes.

## 1.2 Que veut dire « une dispensation de médicaments » ?

La dispensation elle-même, est définie dans l'arrêté du 9 août 1991 dans le code de déontologie des pharmaciens français<sup>1</sup> et dans le code de la Santé Publique (article R.4235-48), qui prévoient que :

« Le pharmacien doit assurer dans son intégralité l'acte de dispensation du médicament, associant à sa délivrance :

- l'analyse pharmaceutique de l'ordonnance médicale ;
- la préparation éventuelle des doses à administrer ;
- la mise à disposition des informations et les conseils nécessaires au bon usage du médicament.

Il a un devoir particulier de conseil lorsqu'il est amené à délivrer un médicament qui ne requiert pas une prescription médicale. Il doit, par des conseils appropriés et dans le domaine de ses compétences, participer au soutien apporté au patient ».

Cette définition n'est pas spécifique au contexte français. Elle peut s'appliquer dans n'importe quel pays où le pharmacien est considéré comme un véritable acteur du système de santé.

L'obligation de conseil, même pour les médicaments qui ne sont pas soumis à prescription médicale, est particulièrement utile dans les pays où l'automédication est une pratique courante de populations peu ou mal informées. L'expression "participer au soutien apporté au patient" peut être interprétée comme une obligation de conseil quand il s'agit de traiter des troubles mineurs pour lesquels le patient ne peut ou ne veut pas recourir à une consultation médicale.

---

1- Cette définition de la dispensation est donnée par le nouveau code de déontologie des pharmaciens publié en 1995 : Art. R. 5015-48 de la section 1 "Participation à la protection de la santé". Le code de déontologie est inclus en France dans le code de la pharmacie

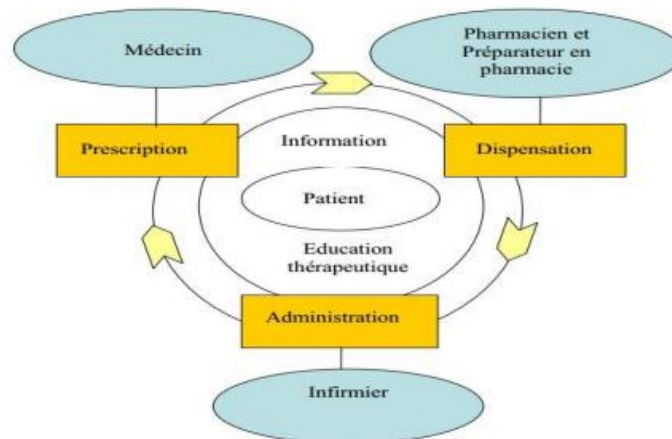


Figure1.1. Circuit du médicament

La dispensation du médicament est l'étape du circuit du médicament qui se situe entre la prescription du médecin et l'administration, réalisée par l'infirmier.

### 1.3 Types de dispensation :

Dans une même structure hospitalière, il peut coexister plusieurs types de distribution. La distribution globale est souvent maintenue pour les services de courts séjours, tels que les services de chirurgie et de réanimation. La distribution globalisée s'organise pour quelques services de l'hôpital où les prescriptions peuvent être obtenues. La distribution individuelle nominative fait l'objet de période de test dans des services de longs séjours. Elle est dans ces services plus faciles à organiser et souvent s'appuie sur un support informatique que les différents partenaires doivent apprivoiser.[1]

#### 1.3.1 Distribution globale :

Le circuit du médicament en distribution globale est le système le plus utilisé à l'hôpital. Pourtant, de nombreuses études ont montré qu'il ne garantissait ni la sécurité des patients, ni la qualité des soins.

D'autre part, l'Infirmier Diplômé d'Etat (IDE) de l'unité de soins commande les médicaments en croisant les prescriptions du médecin et ce qui est disponible dans l'unité de soins, les doses demandées sont préparées par le personnel de la pharmacie et livrées dans l'unité de soins.

Ce type de distribution s'affranchit des prescriptions. Celles-ci peuvent exister mais ne pas parvenir jusqu'au pharmacien. La prescription, si elle existe, n'est pas utilisée par le pharmacien. Elle est archivée dans le dossier du malade. Le pharmacien délivre, non pas un traitement, mais une liste globale de médicaments. Dans ce cas, le pharmacien est le livreur du service clinique qui dresse périodiquement sa commande. C'est le personnel infirmier qui prépare les doses à administrer à partir de leur armoire à pharmacie. Enfin, ce personnel effectue l'administration des médicaments.[1]

### 1.3.2 Distribution globalisée :

Dans ce circuit du médicament, l'ordonnance est réhabilitée. La prescription doit être réalisée et adressée au pharmacien. Celui-ci va globaliser les médicaments nécessaires à la dispensation des ordonnances reçues et les distribuer aux services cliniques. Le pharmacien peut pratiquer l'analyse de l'ordonnance et la valider, en se rapprochant du service clinique pour obtenir toutes informations utiles sur le patient.

C'est le personnel soignant qui prépare les doses à administrer et effectue l'administration.

Ce type de distribution permet au pharmacien de réaliser une délivrance nominative. Néanmoins, il n'assure pas la préparation des doses à administrer. Le pharmacien doit assurer la préparation éventuelle des doses à administrer. Alors le mérite apparent de ce mode de distribution est d'être effectué à partir des prescriptions, cette gestion des stocks de médicaments transforme la dotation pour besoins urgents en une dotation pour besoins courants. La distribution globalisée améliore la sécurité pour le patient. Elle permet une première organisation du circuit du médicament. Elle se rapproche de ce que devrait être l'exercice du pharmacien hospitalier en matière de dispensation.[1]

### 1.3.3 Dispensation nominative, individuelle :

La mission de la pharmacie à usage intérieur (PUI) est d'assurer la dispensation des médicaments pour les malades hospitalisés, comprenant la délivrance nominative des médicaments, associée à l'analyse pharmaceutique de la prescription. Malgré les évolutions réglementaires, la délivrance des médicaments par la pharmacie aux services ou unités de soins est encore majoritairement organisée selon un mode global : commande globale de l'unité de soins à la pharmacie puis approvisionnement de la réserve en médicaments du service par la pharmacie. Les choses ont changé avec la mise en place de la dispensation individuelle et nominative (DIN), qui peut être hebdomadaire (DHIN) ou journalière (DJIN). Le principal avantage de la DIN, outre l'analyse pharmaceutique des prescriptions, est de fournir les médicaments identifiés au nom de chaque malade ; ainsi il limite la manipulation des médicaments par le personnel infirmier. Cette activité est assurée exclusivement par les préparateurs en pharmacie. Le rôle du personnel infirmier est alors la distribution et l'administration du médicament au malade ; ce dernier peut libérer du temps et se recentrer sur des tâches de soins. La mise en place de la DIN peut se faire selon différentes modalités : soit centralisée au sein de la pharmacie, soit délocalisée au sein des unités de soins, assurée dans le cadre d'une préparation manuelle des doses par les préparateurs en pharmacie ou bien être réalisée par un automate de délivrance individuelle.[6,7]

#### a) Les avantages de ce système :

- La DJIN permet de réduire le stock en médicaments et de diminuer les pertes dues à la péremption.
- Elle permet de supprimer les pharmacies de service qui ne sont pas faciles à gérer pour la pharmacie (les dotations pour les besoins urgents persistent).
- Elle réduit considérablement les fuites et les gaspillages de médicaments.
- Elle réduit aussi les utilisations abusives de médicaments utilisés sans grande rigueur.[1]

**b) Les inconvénients :**

La DJIN manuelle nécessite beaucoup de personnel pour déconditionner et reconditionner les doses pour préparer les piluliers et contrôler le travail effectué, délivrer les médicaments.

Or, les préparateurs ne sont pas pléthore sur le marché du travail. Et, alors qu'avec la robotisation, les coûts s'amortissent.

**1.4 Pourquoi automatiser la délivrance de la dispensation des médicaments dans un hôpital ?**

Dans un contexte exigeant en termes de qualité du service rendu et contraint en termes de personnel, et afin de répondre à de réels problèmes de santé publique (risques iatrogènes liés aux erreurs de délivrance de médicaments, difficultés de traçabilité,...) et de maîtrise des coûts, le développement de solutions automatisées a été envisagé. qui exige aussi d'imposer aux établissements de santé un double objectif d'amélioration et de sécurisation du circuit du médicament.



**Figure1.2.** Exemple d'un système de dispensation combiné dans une unité de soin

**1.4.1 La délivrance automatisée des systèmes de dispensation :**

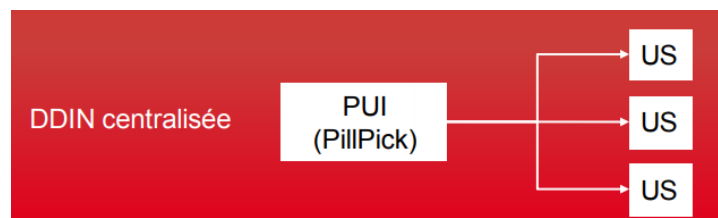
On peut trouver deux distributeurs automatiques sous les deux modèles suivants :

**1.4.1.1 La dispensation centralisée (en PUI) :**

La dispensation permet d'automatiser la DDIN en solution centralisée, qui se fait à partir d'un dépôt central de stockage des médicaments. On distingue deux modes de distribution, par boîte ou par unité de médicament.

### Exemple d'une dispensation centralisée :

Il existe différents systèmes automatisés, tels que le PillPick de la marque Swisslog qui permet d'automatiser la DDIN dans une solution centralisée.



**Figure1.3.** *dispensation centralisée*

Les fonctions principales du robot sont les suivantes :

- Le conditionnement des médicaments en sachets mono doses identifiés individuellement.
- Le stockage des mono doses.
- La délivrance des prescriptions par production d'anneaux individuels par patient regroupant les doses prescrites.
- Le robot présente un haut niveau de flexibilité, il est notamment capable de traiter des conditionnements en vrac.[2]

### Avantages de la dispensation centralisée :

- La mise en place ne nécessite pas une installation, ni d'arrangement spécial.
- Une haute précision et fonctionnement simple et rapide.

### Inconvénients de la dispensation centralisée :

- Elle est couteuse, complexe et difficile de réparer
- limitation de la forme de médicaments délivrés
- Diminution de la qualité des médicaments conservés



### 1.4.1.2 La dispensation décentralisée (PUI locales) :

La distribution des médicaments s'effectue au niveau des mêmes unités de soins, à l'aide des armoires sécurisées décentralisées, à partir d'une interface (écran, logiciel, clavier...) Les médicaments peuvent être sous forme de comprimés, injection ...

#### -Exemple d'une dispensation décentralisée :

Les distances peuvent être plus ou moins importantes au sein d'un établissement. Il est intéressant de réduire les délais de livraison en installant des antennes à proximité des unités de soins. Ces antennes dépendent de PUI.

. Le robot alimente en mono doses des armoires manuelles ou automatisées de délivrance implantées en antennes.[2]

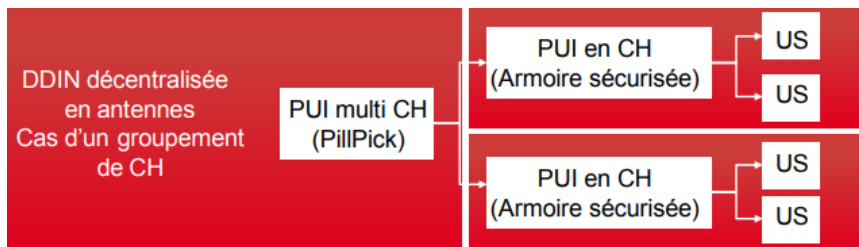


Figure1.4. dispensation décentralisée

#### Les avantages de la dispensation décentralisée :

- Simplicité d'usage avec un taux d'erreurs réduites
- Meilleure gestion de stock
- Maintenance non couteuse
- Une mise en place facile et simple
- Gain du temps de déplacement

#### Les inconvénients de la dispensation décentralisée :

- Besoin d'être associé à la distribution quotidienne
- Réduction des besoins en médicaments, tels que les grandes quantités.

### 1.4.2 L'objectif de la solution automatisée :

Comme conclusion, La solutions automatisées des systèmes de dispensation de médicaments sert a :

- Diminution des erreurs de distribution
- Sécurisation du circuit du médicament et traçabilité
- Diminution des taches fastidieuses et répétitives et poste de travail à faible valeur ajoutée
- Une meilleure utilisation du temps soignant
- La réduction des délais de réalisation des dispensations
- Réduction des surcouts en personnel

- Sécurisation de l'hôpital de demain.

**Chapitre 2**  
**Armoires de dispensation de médicaments**

## 2.1. Introduction :

Les armoires automatisées se retrouvent au cœur du circuit du médicament dans les établissements où elles sont implantées, elles sont utilisées depuis les années 1970 en Amérique du Nord, ce système est assez récent en Europe et très récent en Afrique voire en stade primaire.

Mais l'offre industrielle de ces produits a tendance à se développer.

Ce système d'armoires à pharmacie sécurisées (armoires automatisées) vient de remplacer les armoires à pharmacie classiques des unités de soins par des automates de distribution de médicaments, plus couramment appelés armoires à pharmacie sécurisées (APS). Ces dispositifs commandés par un ordinateur, sont directement réapprovisionnés par des préparateurs en pharmacie et sécurisent le stockage des médicaments dans l'unité de soins. Ils facilitent et guident la sélection des médicaments par les infirmières pour chaque patient, assurant ainsi une délivrance nominative. Cette aide à la cueillette des médicaments limite le risque de confusion entre deux dosages et assure une traçabilité totale de l'accès aux médicaments et permettant aussi des temps de réponse plus courts.



**Figure 2.1.** Armoire à pharmacie sécurisée (APS).

Nous passons dans ce chapitre aux différentes armoires de distribution de médicaments.

À la fin de ce chapitre, nous aborderons le sujet de cette mémoire.

## 2.2. Présentation du système des armoires automatisées :

Les armoires automatisées de distribution et de dispensation de produits pharmaceutiques sont désormais utilisées dans les services cliniques et au niveau des blocs opératoires afin de contrôler l'accès aux divers médicaments du stock.

L'automate ou l'armoire automatisée se présente sous la forme d'une commode à plusieurs tiroirs avec un écran, un clavier et une imprimante intégrée (Fig.2.2).

les tiroirs sont subdivisés en plusieurs compartiments (Fig.2.3). Chaque compartiment peut contenir un seul type de médicament en plusieurs unités, donc chaque médicament est spécifique à un compartiment.

Les données propres au médicament (nom, date de péremption, quantité de médicament disponible...) sont préenregistrées par l'infirmier grâce à un logiciel pour la gestion du stock.

Une fois connectés au système de gestion et après la saisie des données du patient, le tiroir s'ouvre complètement pour permettre l'accès à tous les autres médicaments.



**Figure2.2.** Armoire automatisée



Figure 2.3. Vue d'un tiroir d'une armoire automatisée

### 2.3. Les différents types d'armoires automatisées de dispensation de médicaments :

Nous trouvons également des systèmes automatisés utilisés dans les pharmacies, tels que le système conçu par des entreprises spécialisées. On peut mentionner quelques-uns :

#### 2.3.1. Armoire ARIANA :

L'Ariana distribué par FAHRENBERGER TECHNOLOGIE.

L'Ariana est un robot « intelligent ». Il a une structure très légère, bonne solidité et peu de pièces d'usure et grande fiabilité. Il est conçu pour s'adapter à tout type de pharmacie même les plus exiguës. La partie stockage et la partie robotique sont totalement indépendantes. Il se distingue par un rangement vertical breveté permettant de ranger même des produits cylindriques et par l'absence de tapis roulant. [3]

Le robot permet de traiter jusqu'à cinq commandes simultanément, mais collecte et délivre une seule ordonnance à la fois, grâce à un système à plusieurs casiers, pour éviter toute confusion entre les postes de vente, mais il est plus lent.



Figure2.4. Armoire ARIANA

### 2.3.2. Armoire APOTEKA :

L' « ApotéKa » C'est sans doute le plus simple des automates dans son fonctionnement, ce qui en fait certainement un des plus fiables et le plus rapide des automates. L'Apoteka se présente sous forme de modules à assembler et peut se placer n'importe où dans la pharmacie. Il n'a pas de déflecteurs pour amortir les chutes des boîtes, ce qui permet un accès aisé par l'avant aux boîtes en cas de panne.

Le tapis semble assez résistant pour marcher dessus et assez souple pour amortir les chocs. Les boîtes placées en haut de l'automate font une chute de plus de deux mètres. Cependant, on peut se demander si le fait de marcher sur le tapis ne peut pas entraîner à la longue son usure prématurée, affaire à suivre ... Il faut également penser à mettre les produits lourds et fragiles au plus près du tapis de convoyage, car la chute est rude. [11] Son principal point fort, par rapport aux autres appareils, est le système d'éjection électromagnétique qui dispense d'installer un compresseur (bruyant). Quant aux moteurs entraînant les tapis, ils sont carénés pour réduire leur bruit en fonctionnement. L'automate est couplé au logiciel de vente via le port série: on échange le code, quantité, etc. Un onduleur permet jusqu'à 4 heures d'autonomie à l'automate en cas de coupure électrique. Cependant, les tapis seront paralysés par la coupure de l'alimentation, à moins d'avoir un générateur. Les canaux sont composés de « cornières » particulières permettant un bon calage des spécialités et évitant tout accordéon dans une file.[3]



Figure2.5. Armoire APOTEKA

### 2.3.3. Armoire ROWA :

ROWA est un robot allemand, il se présente comme une grande armoire avec des étagères des deux côtés et un robot au milieu . On peut entrer à l'intérieur de l'enceinte par une porte située à une extrémité.

Le robot fixé sur deux rails se déplace le long des étagères qui ne sont pas inclinées mais horizontales(Fig.2.7). Le rangement est ultra simplifié : il suffit de scanner le code-barres et de poser les boîtes sur un petit tapis qui va les introduire dans l'enceinte. Le robot vient les prendre et se charge de les déposer grâce à son bras sur les étagères à un endroit libre. C'est là un des points forts du système, en plus de ça il a des caméras dans l'enceinte reliée au constructeur. Il s'occupe des produits réfrigérés.

Par rapport à l'Apoteka, il a des points faibles, prix trèsélevé, mode de rangement aléatoire, la lenteur du robot : cinq secondes pour entrer une référence et dix secondes pour sortir la boîte, l'éjection de toutes les boîtes d'une ordonnance plus le convoyage jusqu'au comptoir met dix secondes...[3]



Figure2.6. ROWA



Figure2.7. Rowa vue de l'intérieur



## Chapitre 2 : Armoires de dispensation de médicaments

Il existe une nouvelle technique ROWA, qui peut être réalisée avec des produits sur un espace impressionnant et unique en médecine vétérinaire. Les produits sont parfaitement organisés sur quelques mètres carrés.

Selon le système (Rowa Smart ou Rowa V-MAX)(Fig2.8), on peut gagner du temps et de l'espace plus intéressants. Les produits demandés sont vérifiés directement au moment de l'enregistrement le numéro de lot et la date de péremption qu'ils sont automatiquement mis à jour dans le système.

Il faut entrer les médicaments qui doivent être dispensés dans le catalogue jusqu'à ce qu'ils soient disponibles quelques secondes après votre sortie.[3]



**Figure 2.8.** *Rowa V-MAX*

### 2.3.4. Armoire PYXIS :

Ce système de gestion sécurisée des dispositifs médicaux se présente sous la forme d'armoires de distribution automatisées réparties en plusieurs configurations pour répondre à chaque unité de soins.(Fig2.9)

Le système est très flexible, l'unité principale peut être étendue à une ou plusieurs armoires supplémentaires et à l'unité de contrôle centrale, ce qui permet d'adapter la configuration et le stock de médicaments en fonction de la confidentialité du service. Cette solution n'est disponible que pour le personnel autorisé, renforçant ainsi le contrôle de l'accès aux médicaments. (Fig2.10)



**Figure 2.9.** *Armoire PYXIS*



Figure2.10. Infirmière utilisant le système PYXIS

## 2.4. Les différents types de tiroirs inclus dans les armoires de médicaments :

Il existe différents types de tiroirs, on peut les classer selon des 3 types :

### 2.4.1. Les tiroirs de type Matrix :

Permettent l'accès à l'ensemble des médicaments du tiroir qui sont séparés par des cloisons plastiques, les médicaments stockés ont un niveau de sécurisation peu élevé, C'est le tiroir le mieux adapté à une évolution rapide. Ils peuvent contenir jusqu'à 40 références.



Figure2.11. Tiroir de type matriciel (matrix)

### 2.4.2. Les tiroirs de type Cubie et Mini-Tiroir :

Ils sont disponibles sous deux formes différentes, adaptés soit pour les seringues soit pour les ampoules.

Pour un niveau de sécurité et traçabilité optimale ne permettent l'accès qu'à une seule référence et un bon contrôle des produits sensibles : stupéfiants, produits coûteux...



Figure2.12. Tiroir type cubie / mini-tiroirs

### 4.2.3. Les tiroirs de type Carroussel :

Ils ne permettent l'accès qu'à une seule référence, ces tiroirs sont utilisés pour les substances stupéfiantes. Le tiroir s'ouvre et ne présente que la portion contenant le médicament désiré par un système tournant de cache métallique. Le nombre de références contenues dans ces tiroirs varie de deux à douze



Figure2.13.Tiroir type carroussel

## 2.5. Fonctionnement des armoires a tiroir :

Le profil de l'utilisateur doit toujours être préalablement enregistré. C'est ce profil (personnel soignant, aide-soignant (AS), médecin, pharmacien) qui déterminera ainsi la liste des fonctions accessibles. Le meilleur exemple est celui de l'aide-soignant dont le profil préenregistré dans la console centrale ne permet pas l'accès à tous les médicaments. Le principe de remplissage est lui aussi intéressant et permet largement de sécuriser l'acte de dispensation. Ainsi, chaque emplacement de médicament est étudié, de manière à éviter d'éventuelles confusions. Les médicaments sont sortis nominativement et leur accès est séquentiel.

La manipulation de l'armoire pour la dispensation se fait à l'aide du PC de l'armoire, qui est équipé d'un logiciel qui gère les étapes de la dispensation, en commençant par l'introduction du « nom d'utilisateur » et du « mot de passe » de l'infirmier, une alarme informera s'il y a des médicaments périmés pour les retirer.

On choisit le médicament à administrer au patient, ainsi que sa quantité, et là on aura l'ouverture du tiroir qui contient le médicament choisi, quelques secondes plus tard la poche qui contient le médicament s'ouvre aussi, après la prise du médicament, un bouton poussoir 'Close' provoque la fermeture du tiroir et de la poche.

L'ouverture du tiroir se fait par la mise en marche d'un moteur électrique monté sur le tiroir avec un système d'engrenages qui facilite le glissement du tiroir jusqu'à la sortie, et ce dernière sera détectée par un capteur (contact de fin de course) qui provoque l'arrêt du moteur; quand il est ouvert, l'ouverture des poches est faite par l'excitation des électro-aimants des attaches qui vont libérer le couvert de la poche choisie, et la poussée du couvert vers le haut est assurée par des ressorts montés au bord du couvert .

Le principe de fonctionnement peut être résumé de la manière suivante :

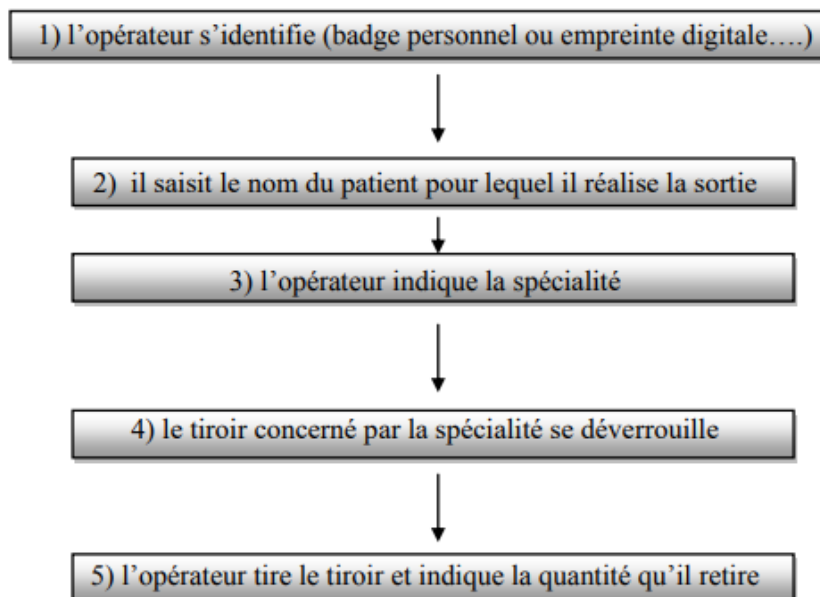


Figure2.14. Principe de fonctionnement d'une armoire automatisée

## 2.6. La problématique :

L'un des soucis majeurs des pharmaciens hospitaliers est que le bon médicament au bon patient. Avoir la certitude de cette délivrance est le but que cherchent à atteindre ces pharmaciens. L'introduction de ces armoires automatisées dans le milieu hospitalier a permis bien des choses, tels que la réduction des erreurs et la sécurisation de la délivrance et du circuit du médicament en général, un meilleur contrôle de l'utilisation des médicaments grâce à la possibilité de traçabilité complète du circuit, la réduction des délais de réalisation des dispensations avec un meilleur utilisation de temps, l'optimisation de la gestion de stocks dans chaque service par un suivi informatisé des mouvements de stockage et déstockage et une automatisation des réapprovisionnements.

Dans une étude menée par Oswald et Caldwell, les auteurs ont évalué les taux d'erreur de remplissage et de distribution avant et après la mise en œuvre d'une armoire automatisée (Automated carousel System) dans un hôpital universitaire de Stanford de 613 lits. Ils ont pu constater l'amélioration drastique du taux d'erreur. Dans une autre étude, les auteurs ont analysé l'impact d'un système automatisé de distribution (armoire automatisée) dans l'unité de l'hôpital de soins intensifs, sur le plan financier et sur le plan des ressources humaines, ils ont montré que le coût mensuel par patient avec le système automatisé, a été réduit de 20,3% et le nombre de médicaments en stock a augmenté de 11,4%. Par ailleurs, moins d'espace était nécessaire pour le stockage alors que le personnel avait besoin de moins de temps, réduction de 2H en moyenne par jour.

Un autre aspect très crucial dans l'installation des systèmes automatisés de dispensation de médicaments réside dans la prévention des erreurs d'administration et de réapprovisionnements et c'est à ce dernier point qu'on s'intéresse. Effectivement, confondre entre les médicaments est une cause fréquente des erreurs médicamenteuses. Ces erreurs se produisent essentiellement en raison de similitudes entre ces médicaments, soit parce qu'ils ont la même forme ou bien ils ont le même dosage (50mg pour Metformin et 50mg pour Metronidazole), etc....

Plusieurs techniques existent pour parer aux erreurs d'administration et de réapprovisionnements, comme par exemple pour les noms similaires, on peut citer recours aux lettres majuscules pour l'écriture des noms de médicaments, comme pour Hydroxyzine et Hydralazine ; on les écrit HydrOXYzine pour marquer la différence. [8]

L'utilisation du code-barres pour identifier les médicaments constitue un autre moyen pour la prévention des erreurs d'administration.

Pazour et al, ont abordé le problème de la localisation des médicaments à l'intérieur des tiroirs dans le but de minimiser les erreurs humaines de sélection. Deux médicaments sont dit incompatibles ou similaires quand ils présentent un risque de confusion pour les infirmiers,

## Chapitre 2 : Armoires de dispensation de médicaments

Dans notre travail on cherchera un moyen pour interdire de placer les différents médicaments incompatibles côte à côte dans les différents compartiments d'un tiroir d'une armoire automatisée de dispensation, notre solution devra obéir à un seul critère celui qu'il ne faudrait jamais et en aucun cas placer deux médicaments incompatibles dans deux compartiments voisins (c'est-à-dire partageant un côté). C'est ce critère de sécurité, qui guide le choix des différents emplacements de ces médicaments.

On va essayer avec les réseaux de Pétri RdP et la méthode des invariants de la synthèse de contrôleur directe et indirecte (inverse) à reprendre a cette problématique.

## **Chapitre 3**

# **Approche de la synthèse de contrôleur par la méthode des invariants**

### 3.1. Introduction :

Dans ce chapitre on va discuter la synthèse de contrôleur. D'abord on va définir ce que c'est un système à événements discrets puis on va présenter un rappel sur les réseaux de Pétri.

On va s'intéresser par la suite à la synthèse de contrôleur ou la commande sous supervision (synthèse de contrôleur).

À la fin, on discutera de la méthode des invariants de la synthèse de contrôleur basée sur les réseaux de Pétri.

### 3.2. Système à Événement Discrets (SED) :

Les systèmes à événements discrets (SED) sont des systèmes dynamiques dont l'espace des états est discret et dont l'évolution est conforme à l'occurrence d'événements physiques à des intervalles de temps éventuellement irréguliers ou inconnus. La trajectoire des états est constante par morceaux. Ces systèmes sont une abstraction utile pour décrire et modéliser de nombreux systèmes conçus par l'homme tels que ; les systèmes de production et ateliers flexibles, les systèmes informatiques, Réseaux de communication et de transport, Planification de tâches.

Considérons l'exemple d'une souris dans un labyrinthe.

Une souris se déplace de manière spontanée (elle agit sans intervention extérieure) à l'intérieur d'un labyrinthe.

Les salles  $S_i$  communiquent par des portes unidirectionnelles  $P_1$  et  $P_3$  et bidirectionnelle  $P_2$ .

On note par  $P_i$  l'évènement « la souris passe par la porte  $P_i$  »

Les situations sont :

- La souris est dans la salle  $S_1$
- La souris est dans la salle  $S_2$
- La souris est dans la salle  $S_3$

Ce qui définit trois états différents (A, B et C), relatifs aux possibilités d'occupation des salles.

L'espace d'état s'écrit  $X = \{A, B, C\}$

Soit  $E$  l'ensemble des événements :  $E = \{P_1, P_2, P_3\}$ .

Le passage de l'état « souris en  $S_0$  » (état A) à « souris en  $S_1$  » (état B) au lieu sur l'occurrence de l'évènement  $P_1$ , etc...

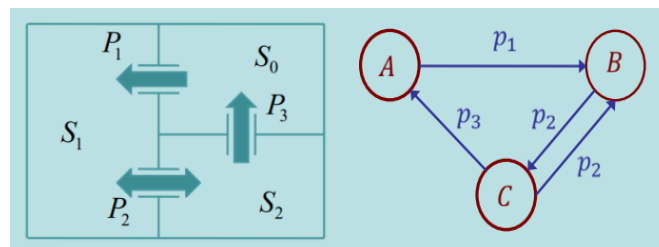


Figure 3.1. changement d'état par occurrence des événements dans un SED



Il existe des méthodes formelles reposent sur l'utilisation d'outils tels que les réseaux de Pétri. C'est pour cela qu'une partie de notre travail sera consacrée à développer une approche pour passer du contrôleur SED synthétisé vers le RdP qu'on va présenter dans ce chapitre.

### 3.3. Réseaux de Pétri :

Les réseaux de Pétri constituent un outil très approprié pour étudier les systèmes à événements discrets en raison de la puissance de modélisation et de leurs propriétés mathématiques. Les réseaux de Pétri ont, par rapport aux automates, l'avantage d'être un modèle beaucoup plus général, bénéficiant de structures beaucoup plus riches, s'adaptant parfaitement à la description de certains types de SED. A partir de RdP, on peut facilement arriver à l'automate par construction du graphe des marquages. Dans cette section nous présenterons d'abord les notions de base de RdP dont nous avons besoin dans notre travail. Le type de RdP qui nous intéresse, c'est le RdP synchronisé où à chaque transition est associé un événement.

#### 3.3.1. Notions de base sur RdP :

Un Réseau de Pétri est un graphe orienté comportant :

- Un ensemble fini de places,  $P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_m\}$ , symbolisées par des cercles et représentant des conditions : une ressource du système (ex : une machine, un stock, un convoyeur, ...)

L'État d'une ressource du système (ex. : machine libre, stock vide, convoyeur en panne, ...)

- Un ensemble fini de transitions,  $T = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_n\}$ , symbolisées par des traits et représentant l'ensemble des Evènements (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.

**Définition 1:** Un RdP synchronisé est défini par un 7-tuplet

$R = \{P, T, \Sigma, E, Pré, Post, M_0\}$  où  $P = \{P_1, P_2, P_3, \dots, P_N\}$  est l'ensemble des places ;

$T = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_L\}$  est l'ensemble des transitions ;

$P \cap T = \emptyset$  ; c'est à dire que les ensemble T et P sont disjoints ;

$\Sigma = \{\varepsilon, \sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n\}$  est l'ensemble des événements ; ( $\varepsilon$  a été utilisé pour présenter l'évènement toujours occurrent) ;

E est la fonction de  $T \rightarrow \Sigma$  qui associe à chaque transition un événement ;

**Pré** :  $P \times T \rightarrow \{0,1\}$  est l'application d'incidence avant ;

**Post** :  $T \times P \rightarrow \{0,1\}$  est l'application d'incidence arrière ;

**M0** est l'état initial  $P \rightarrow R$ .

Au lieu de Pré et Post en général nous utilisons **W**, la matrice d'incidence qui est calculable à partir de l'ensemble Pré et Post comme ci-dessous :

$$W = \text{Post} - \text{Pré}$$

Dans un RdP le nombre de marques dans les places est quelconque. Cependant dans notre travail, on s'intéresse à la commande, et nous ne considérerons que les RdP saufs ou chaque place contient au plus une marque. Ce type de RdP est appelée **sauf** ou **binnaire**.

### 3.3.2. Le marquage :

Dans les RdP, nous pouvons représenter la dynamique du système par l'existence ou l'absence de marque dans les places. La figure ci-dessous représente un RdP marqué.

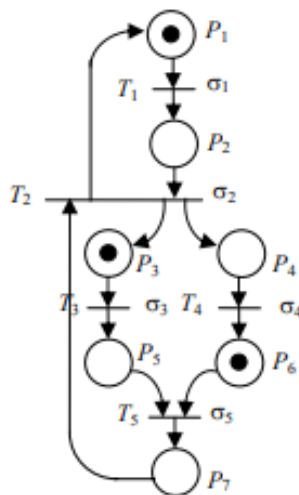


Figure3.2. Réseau de pétri marque

Chaque place contient un nombre entier (positif ou nul) de marques ou jetons. Le nombre de marque contenu dans une place  $P_i$  sera noté  $M(P_i)$  soit  $m_i$ . Pour l'exemple considéré,

On a :  $m_1 = m_3 = m_6 = 1$  et  $m_2 = m_4 = m_5 = m_7 = 0$ . Le marquage du réseau,

**M** est défini par le vecteur de ses marquages,

C'est-à-dire :  $M0^T = [m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, m_6, m_7]$ .

Le marquage du RdP de la figure ci-dessus est donc :

$$M0^T = [1, 0, 1, 0, 0, 1, 0].$$

Le marquage est l'état du système à un certain instant. L'évolution de l'état correspond donc à une évolution du marquage, évolution qui se produit par le franchissement de transition, comme nous allons le voir. Dans cette approche nous allons utiliser autre présentation pour l'état. Dans les réseaux saufs, une place peut être marquée ou non, donc si l'existence du nom de places est utilisée pour les places marquées, l'absence de ces noms signifie que les places ne sont pas marquées.

Par exemple le marquage M peut être représenté par l'ensemble des places marquées :  $M0 = \{P1 P3 P6\}$  ou plus simplement :  $M0 = P1 P3 P6$ .

Maintenant nous formalisons ce type de présentation :

#### Notation 1 :

Soit  $P = \{P1, P2, \dots, PN\}$  l'ensemble des places d'un RdP R et  $M : M^T = [m1, \dots, mN]$   $m_i \in \{0,1\}$ , un marquage quelconque, on peut représenter le marquage M comme ci-dessous :  $M = \{P_i \mid i \in \{1, \dots, N\} \text{ et } m_i = 1\}$

Il est possible de définir formellement cet ensemble, mais définissons d'abord l'ensemble des vecteurs booléens.

**Définition 2:** L'ensemble  $\{0,1\}^N$  représente l'ensemble de tous les vecteurs booléens de dimension N.

Un marquage est un vecteur de  $\{0,1\}^N$ . L'ensemble des places marquées d'un marquage est donné par une fonction Support définie ci-dessous.

**Définition 3 :** La fonction Support (X) d'un vecteur  $X \in \{0,1\}^N$  est telle que :

Support (X) = Ensemble des places marquées dans le vecteur X

Le support du vecteur  $M0^T = [1, 0, 1, 0, 0, 1, 0]$  est :

Support (M0) =  $\{P1, P3, P6\}$  ou plus simplement

Support (M0) = P1 P3 P6

Il est possible de comparer deux marquages. Nous utilisons la définition ci-dessous pour cela.

**Définition 4 :** Soit M1 et M2 deux marquages accessibles d'un RdP R1 et  $P = \{P1, P2, \dots, PN\}$  l'ensemble des places de ce RdP :

$M1 > M2$  Si  $\forall Pi \in P / M1(Pi) \geq M2(Pi)$  et  $\exists Pi \in P / M1(Pi) > M2(Pi)$

$M1 < M2$  Si  $\forall Pi \in P / M1(Pi) \leq M2(Pi)$  et  $\exists Pi \in P / M1(Pi) < M2(Pi)$

$M1 = M2$  Si  $\forall Pi \in P / M1(Pi) = M2(Pi)$

**Remarque 1.2** : Pour les RdP saufs,  $M1 < M2$  signifie que Support (M1)  $\subset$  Support (M2). Dans ce cas nous disons que le marquage M2 est couvert par le marquage M1.

### 3.3.3. Propriétés des réseaux de Pétri :

Dans cette section, on considère les réseaux de Pétri ordinaires et nous présentons les propriétés qui nous seront nécessaires pour la présentation de notre contribution.

**Marquages accessibles** : On notera  $M_R$  l'ensemble des marquages accessibles d'un RdP R à partir du marquage initial  $M_0$ .

**RdP borné** : Une place  $P_i$  est dit bornée pour un marquage initial  $M_0$  s'il existe un entier naturel  $k$ , tel que pour tout marquage accessible à partir de  $M_0$ , le nombre de marques dans  $P_i$  est inférieur ou égal à  $k$ . Dans notre travail cette borne  $k = 1$  (**RdP sauf**) sauf pour les places de contrôle comme on le verra par la suite.

**Transition vivante** : Une transition  $T_j$  est vivante pour un marquage initial  $M_0$  si pour tout marquage accessible  $M_i \in M_R$ , il existe une séquence de franchissement  $S$  qui contient la transition  $T_j$ , à partir de  $M_i$ .

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

**Blocage** : un blocage est un marquage tel qu'aucune transition ne peut être validée.

**Conflit structurel** : Un conflit structurel correspond à un ensemble d'au moins 2 transitions  $T_1$  et  $T_2$  qui ont une place d'entrée en commun  $P_i$ .

**Conflit effectif dans un RdP sauf** : Il y a un conflit effectif dans un RdP sauf lorsqu'il y a au moins deux transitions validées synchronisées avec le même événement.

**Invariants** : Soit R un RdP et P l'ensemble de ses places. On a un invariant de marquage, s'il existe un sous-ensemble de places  $P_i$  inclus dans P et un vecteur de pondération  $Q = (q_1, q_2, \dots, q_r)$ , dont tous les poids  $q_i$  sont des nombres entiers positifs, tels que :  $q_1 M(P_1) + q_2 M(P_2) + \dots + q_r M(P_r) = \text{constante}$ , pour tout  $M \in M_R$ .

### 3.3.4. 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. Le franchissement d'une transition fait évoluer le marquage du réseau en retirant une marque de chacune des places en amont de la transition et en ajoutant une marque dans chacune des places en aval de la transition. Pour les RdP saufs, il y a un seul franchissement à la fois, et la durée de ce franchissement est nulle. Dans un RdP synchronisé, une transition validée est franchie à l'occurrence de l'évènement qui lui est associé.

Dans la figure ci-dessous la transition T1 est franchissable lorsque l'évènement  $\sigma_1$  se produit. Le résultat du franchissement de cette transition est indiqué dans la même figure.

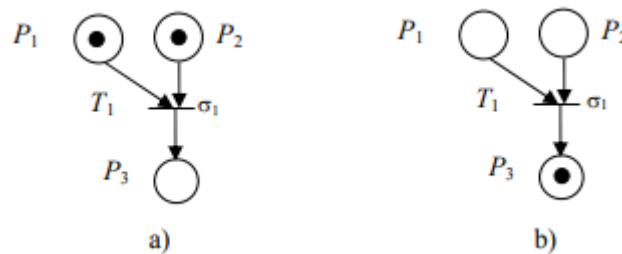


Figure 3.3. Franchissement d'une transition

A chaque séquence de franchissement, est associé un vecteur caractéristique noté  $\bar{S}$ . C'est un vecteur de dimension L (nombre de transitions) où le composant numéro j correspond au nombre de franchissements de la transition Tj 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 :  $M_K = M_i + W$ .

$\bar{S}$  est le vecteur caractéristique d'une séquence S qui mène de  $M_i$  à  $M_K$ .

### 3.3.5. Ensembles des marquages accessibles :

A partir d'état initial par le franchissement des transitions, nous obtenons un ensemble des marquages. Chaque marquage est accessible par une séquence d'évènements. Nous pouvons représenter cet ensemble de marquages et des changements entre marquages par un graphe appelé : graphe des marquages accessibles.

Le graphe des marquages est composé de nœuds qui correspondent aux marquages accessibles, et d'arcs correspondant aux franchissements de transitions faisant passer d'un marquage à l'autre.

Le graphe de marquages d'un RdP est un automate sans états marqués. Formellement un graphe de marquages G peut être défini de la façon suivante :

**Définition 1.7** : Un graphe de marquages  $G$  est un 4-tuplet  $A = (M, \Sigma, \delta, M_0)$  où  $M$  est l'ensemble fini des marquages (RdP sauf).

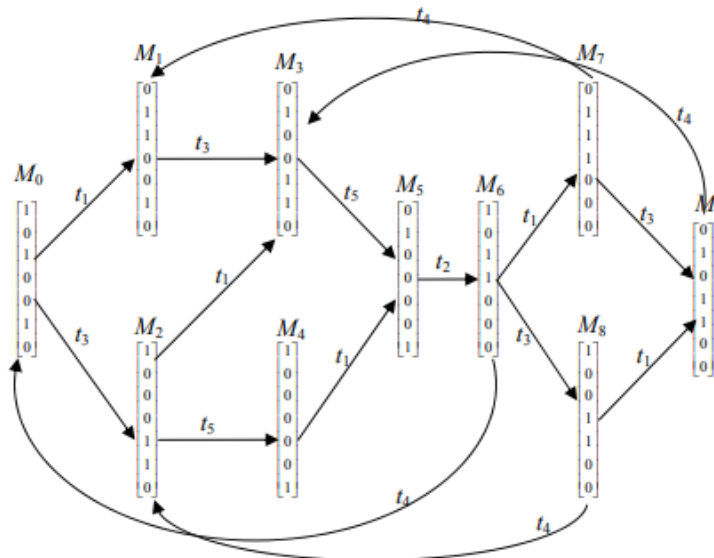
$\Sigma$  est l'ensemble fini des évènements associés aux transitions.

$\delta$  est la fonction de transition d'états de  $M \times \Sigma$  vers  $M$  qui à tout couple (état origine et évènement) associe un état d'arrivée.  $M_0 \in M$  est le marquage initial.

La figure 3.2 de réseau de Pétri marqué présente un RdP avec son marquage initial  $M_0^T = [1, 0, 1, 0, 0, 1, 0]$ .

A partir de  $M_0$ , les transitions  $T_1$  et  $T_3$  peuvent être franchies. Si la transition  $T_1$  franchie, on atteint le marquage  $M_1^T = [0, 1, 1, 0, 0, 1, 0]$ . Dans ce cas la seule transition franchissable sera  $T_3$ .

Quand la transition  $T_3$  est franchie, on atteint le marquage  $M_2^T = [1, 0, 0, 0, 1, 1, 0]$ . Dans ce cas les deux transitions  $T_1$  et  $T_5$  sont franchissables. Par cette méthode on peut calculer tous les états possibles à partir d'état initial  $M_0$ . La figure suivante donne le graphe de marquages du RdP.



**Figure 3.4.** Graphe de marquage du RdP de la fig 3.2

Le graphe de marquages du modèle RdP d'un système est l'automate de ce système en remplaçant chaque transition par l'évènement associé. Nous utiliserons donc conjointement les propriétés des deux modèles.

### 3.4. L'invariant de marquage et les réseaux de Pétri conservatifs :

L'invariant de marquage est une propriété structurelle importante pour analyser les RdP car il ne dépend pas du marquage. Il permet d'étudier la structure du réseau indépendamment de toute évolution dynamique. Des invariants de franchissement sont également définis dans les RdP, mais ils ne sont pas utilisés dans ce travail. L'invariant de marquage correspond à une somme pondérée de marquages de places qui est constante quel que soit le marquage accessible. 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  $N \times L$  et,  $X$  est un vecteur de dimension  $N$  appelé P-semi-flot. L'invariant de marquage déduit de tout P-semi-flot est donné par la relation suivante :

$$X^T \cdot M = X^T \cdot M_0 = \text{constant}$$

Où :  $M_0$  est le marquage initial du RdP, et  $M$  représente tout marquage accessible.

Il y a des algorithmes efficaces pour trouver tous les invariants minimaux d'un RdP (David et al. 2005).

Dans un invariant, la partie constante correspond à un entier quelconque. Dans cette approche, nous nous intéressons à un cas particulier où les parties constantes des invariants minimaux sont égales à 1.

Pour la majorité des systèmes qui peuvent être modélisés par les RdP saufs, on a des fonctionnements cycliques. Cette propriété d'invariants est donc utilisable dans beaucoup de cas. Par exemple considérons une machine à trois états : marche, repos et panne. Le modèle RdP de cette machine est présent dans la figure suivante.

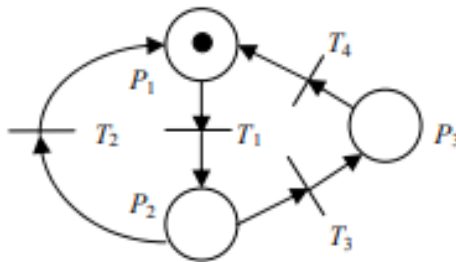


Figure3.5. Modèle RdP d'une machine

Dans ce modèle, on a un invariant de marquage pour l'ensemble des places  $P = \{P1, P2, P3\}$  :

$$M(P1) + M(P2) + M(P3) = 1$$

On peut récrire plus simplement cette relation :  $m1 + m2 + m3 = 1$ .

Dans la figure suivante, on trouve un modèle d'un système de production composé de deux machines couplées.

L'ensemble des places P est :  $P = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7\}$ .

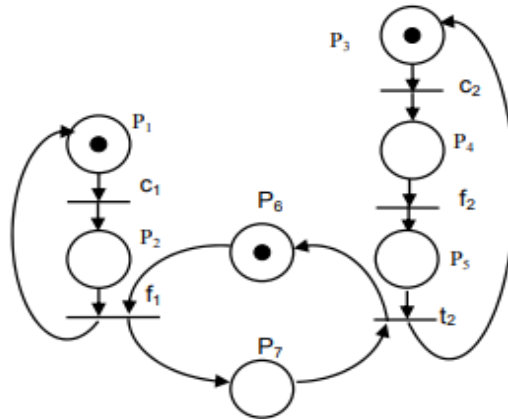


Figure3.6. RdP conservatif

Ce RdP a 3 invariants minimaux qui sont :

$$P' = \{P_1, P_2\} \Rightarrow m_1 + m_2 = 1$$

$$P'' = \{P_3, P_4, P_5\} \Rightarrow m_3 + m_4 + m_5 = 1$$

$$P''' = \{P_6, P_7\} \Rightarrow m_6 + m_7 = 1$$

Les ensembles  $P'$ ,  $P''$ ,  $P'''$ , sont des composantes conservatives. A partir de cet ensemble de relations, nous pouvons construire l'invariant suivant :

$$m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5 + m_6 + m_7 = 3$$

Dans cet invariant nous pouvons trouver toutes les places du RdP. Ce type de réseaux s'appelle : Réseau de Pétri conservatif. Dans le cas général, un RdP R est dit conservatif si P est une composante conservative.

Dans une première partie de notre travail, nous nous intéresserons à ce type de réseaux de Pétri.

### 3.5. Synthèse de contrôleur :

Pour les systèmes peu complexes, pour imposer un fonctionnement respectant un cahier des charges désiré. La manière la plus facile de contrôle est la conception directe du modèle supervisé du système. Mais, dès que la complexité du système augmente, cette méthode ne peut pas garantir le respect du cahier des charges. Pour surmonter ce défaut, des méthodes formelles ont été développées qui permettent la synthèse de contrôleurs pour des systèmes d'événements distincts. Ces méthodes reposent sur l'utilisation d'outils tels que les automates programmables et les réseaux de Pétri.



**L'objectif :**

L'objectif de synthétiser un contrôleur pour un modèle donné, tel que le fonctionnement du procédé couplé au contrôleur reste toujours compris dans l'ensemble des comportements valides. De plus, ce fonctionnement doit être le plus permissif possible. le but de la synthèse est de déterminer le sous-ensemble des comportements du procédé qui appartient aussi à la spécification. Ce sous-ensemble caractérise le langage du contrôleur et décrit les comportements du système contrôlé. Il est important, à ce niveau, de mentionner qu'il y a certains événements qui ne peuvent pas être interdits par le superviseur : les événements incontrôlables. L'importance du concept de contrôlabilité pour la théorie de la supervision des SED sera clarifiée dans les sections suivantes. Un procédé peut être couplé à un ou à plusieurs contrôleurs. Si nous utilisons un contrôleur unique, la commande sera dite centralisée. S'il y a plusieurs contrôleurs couplés au même procédé, la commande sera modulaire.

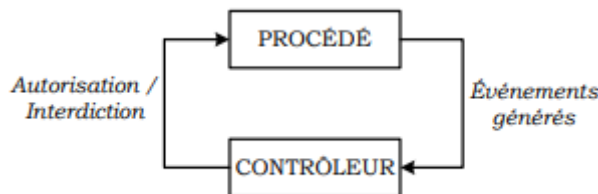
**3.6. Le concept de la commande par supervision :**

Pour pouvoir construire un formalisme de contrôle pour un système donné, il est essentiel d'avoir une très bonne connaissance de deux notions de base : le procédé physique qui doit être contrôlé et le cahier des charges (ou la spécification) qu'on souhaite lui imposer. C'est à partir de ces deux éléments et du schéma de supervision qui décrit leur relation que le calcul du contrôleur est réalisé.

**3.6.1 Le schéma de supervision :**

Toutes les informations utiles concernant le procédé physique à contrôler sont intégrées dans son modèle. Le procédé est considéré comme un générateur d'événements, c'est-à-dire un SED évoluant de façon spontanée en générant des événements.

Le comportement du procédé en isolation n'est en général pas satisfaisant, dans le sens où il ne respecte pas certaines propriétés désirables pour l'exploitation. Ces propriétés constituent les objectifs de contrôle, ou la spécification. Le but du contrôle est de restreindre le comportement du procédé afin d'assurer le respect de ces objectifs. Cette restriction est réalisée par le biais d'un contrôleur, S, qui est lui-même un SED.



**Figure 3.7.** *Le schéma de supervision*

Dans ce schéma, un procédé est couplé à un superviseur. Les entrées du superviseur sont les sorties du procédé. Le rôle de superviseur est d'autoriser ou d'interdire l'occurrence d'évènements dans le procédé. Par ce rôle, le superviseur peut changer le fonctionnement du procédé. [4]

Le fonctionnement du procédé couplé au contrôleur, appelé fonctionnement en boucle fermée.

Le contrôle ajoute au procédé des contraintes supplémentaires, induisant un comportement souhaité pour le système en boucle fermée. [5]

**Remarque :** Le rôle du superviseur se cantonne à interdire l'occurrence d'évènements dans le procédé. Il ne peut en aucun cas forcer des Evènement à se produire. Il s'ensuit donc que le superviseur ne peut que restreindre le fonctionnement du procédé. [4]

#### 3.6.2. Hypothèse :

Deux événements ne peuvent pas être simultanément générés par le procédé. Cette hypothèse est basée sur le fait que les événements ont une durée nulle. Les procédés considérés évoluent à des instants continus du temps, et la probabilité que deux événements soient simultanément générés par le procédé est aussi nulle.

Lors de toute discussion sur le contrôle des SED, il est important de réfléchir aussi au problème de l'optimalité. L'interdiction des comportements indésirables représente un aspect important du contrôle.

Mais, il existe un autre aspect, également important : la garantie du fait que le système n'est soumis à aucune restriction inutile. L'optimalité du contrôleur ne peut être assurée que lorsque cette deuxième exigence, la condition de comportement maximal permissif, est elle aussi garantie. [5]

#### 3.6.3. Contrôlabilité :

Considérons le schéma de contrôle par supervision (Fig3.7). Il y a deux questions fondamentales qui doivent être prises en compte dans ce contexte :

- 1) le contrôleur est limité en termes de contrôlabilité des événements possibles dans le procédé
- 2) il est aussi limité en termes d'observabilité des événements exécutés par ce dernier.

Dans ce qui suit, nous allons analyser seulement la question de la contrôlabilité, qui est essentielle pour les résultats présentés dans cette mémoire. Des détails sur l'observabilité et ses implications peuvent être trouvés dans [Cassandra& Lafortune, 2008].

L'existence des événements incontrôlables est une conjoncture usuelle dans la modélisation des systèmes automatisés réels. Ils peuvent représenter, soit des circonstances fondamentalement inévitables, telles que l'arrivée d'une panne ou la variation de la valeur repérée par un capteur, soit des actions qui ne peuvent pas être anticipées ou prévues à cause des limitations matérielles, soit des actions qu'on a choisi de désigner comme incontrôlables, telles que les événements ayant une très haute priorité ou le top d'un horloge.

Quel que soit le cas de modélisation, le problème du point de vue du contrôle est le même : il faut ajouter des contrôles supplémentaires, car tout événement qui ne peut pas être interdit doit être toujours considéré comme faisant partie du comportement en boucle fermée. L'incontrôlabilité peut alors très rapidement compliquer la recherche d'un contrôleur garantissant un fonctionnement désiré pour le système supervisé. Si dans le cas des exemples très simples il est, malgré tout, il est possible de faire appel à l'intuition pour calculer un contrôleur satisfaisant même dans l'éventualité de l'incontrôlabilité.

### 3.7. Synthèse de contrôleur basée sur les Réseaux de Pétri par la méthode des invariants :

Nous allons décrire maintenant, comment les invariants de marquage peuvent être utilisés pour calculer de manière simple le contrôleur d'un procédé modélisé par un RdP. Le système qui doit être contrôlé est modélisé par un RdP, ce réseau s'appelle modèle du procédé, la matrice d'incidence du réseau du procédé est WP. Il est possible que le comportement dynamique du procédé viole certaines contraintes imposées. Dans ce cas, un système de commande doit être synthétisé. Le contrôleur fonctionne en parallèle avec le procédé, son rôle est de surveiller le procédé et de prendre des actions correctives pour éliminer tout comportement indésirable [4]. Soit  $W_c$  la matrice d'incidence du RdP correspondant au contrôleur. Ce RdP est formé des transitions du modèle du procédé et d'un ensemble séparé des places. Le RdP du système commandé est formé du RdP du procédé et celui du superviseur. Considérons une spécification qui impose que si on arrête la machine M1 la machine M2 ne doit pas s'arrêter aussi.

On peut présenter cette spécification par la contrainte ci-dessous :

$$M(P_{13}) + M(P_{23}) \leq 1$$

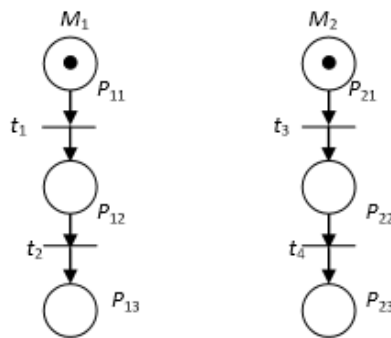


Figure3.8. Modèle Rdp

Où : P13 représente la place du moteur 1 en état d'arrêt et P23 représente la place du moteur 2 en état d'arrêt.

Cela signifie que les places P13 et de P23 ne peuvent pas être marquées en même temps. Maintenant comment peut-on construire un contrôleur qui garantit cette contrainte ?

Yamalidou et al. (Yamalidou et al. 1996) ont présenté une méthode qui consiste à ajouter une place de contrôle.

L'objectif de superviseur est de forcer le système à respecter des contraintes de type  $(\vec{l}, k)$

On peut représenter ce type de contraintes de la manière suivante :

$$\sum_{i=1}^n l_i \cdot M(P_i) \leq k \quad (1)$$

Où :  $M(P_i)$  est le marquage de la place  $P_i$ ,  $l_i$  et  $k$  sont les nombres entiers. Le nombre  $l_i$  représente le poids du marquage d'une place dans la contrainte et  $k$  la borne.

Par exemple pour la contrainte  $M(P13) + M(P23) \leq 1$

$k = 1$  et  $l_{11} = 0, l_{21} = 0, l_{12} = 0, l_{22} = 0, l_{13} = 1, l_{23} = 1.$

Chaque inégalité de type (1) peut-être transformée en une égalité en ajoutant une variable positive et entière  $M(P_c)$ , la contrainte devient :  $M(P13) + M(P23) + M(P_c) = 1,$

Et en général :

$$\sum_{i=1}^n l_i \cdot M(P_i) + M(P_c) = k \quad (2)$$

Cette variable représente une nouvelle place  $P_c$  qui contient le marquage supplémentaire nécessaire pour satisfaire l'égalité. Elle garantit que la somme pondérée de marques dans les places du réseau de procédé reste toujours inférieure ou égale à  $k$ . 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  $M(P_c)$  introduit un invariant de marquage dans le système contrôlé défini par (2).

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

Soit  $\bar{S}$  le vecteur caractéristique d'une séquence  $S$  qui mène de  $M_j$  à  $M_k$ . Le marquage atteint  $M_k$  est donné par l'équation fondamentale :

$$M_k = M_j + W \cdot \bar{S} \quad (3)$$

Tout  $X$ , tel que  $X^T = [1, l_1, \dots, l_i, \dots, l_n, 1] = [L^T, 1]$ , où  $l_i \in \mathbb{N}$ , permet d'avoir l'invariant de marquage donné par la relation suivante :

$$X^T \cdot M_k = X^T \cdot M_j = X^T \cdot M_0 \quad (4)$$

En multipliant l'équation (3) par  $X^T$  et en utilisant la relation (4) nous avons :

$$X^T \cdot M_k = X^T \cdot M_j + X^T \cdot W \cdot \bar{S} \Rightarrow 0 = X^T \cdot W \cdot \bar{S} \Rightarrow X^T \cdot W = 0 \quad (5)$$

Soit  $W_{PC}$  la matrice d'incidence du RdP correspondant au système contrôlé. Chaque place du contrôleur va ajouter une ligne à la matrice d'incidence du système (procédé et spécifications)  $W_p$ . La matrice WPC du système contrôlé est composée de deux matrices, la matrice originelle du modèle  $W_p$  et la matrice d'incidence du contrôleur  $W_c$  [4].

A partir de relation (2), la matrice  $L$  est construite<sup>2</sup>. Elle permet de calculer de manière algébrique la matrice d'incidence du contrôleur par les formules données ci-dessous. C'est ce calcul extrêmement simple qui a rendu cette approche très populaire.

$$W_c = -L^T \cdot W_p \quad (6)$$

$$W_{c\_ini} = k - L^T \cdot M_{p\_ini}$$

Où  $W_{c\_ini}$  est le marquage initial des places de contrôle et  $M_{p\_ini}$  est le marquage initial du procédé, prenons l'exemple de la figure 3.8, la matrice d'incidence du procédé  $W_p$  est :

$$W_p = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad M_{p\_ini} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

<sup>2</sup> - Pour une seule contrainte nous avons une matrice avec une seule ligne.

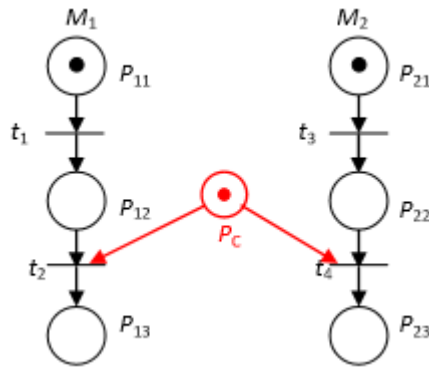
A partir de (6), nous pouvons calculer la partie  $W_c$  de la matrice incidence du système:

$$M(P_{13}) + M(P_{23}) \leq 1 \quad \Rightarrow \quad L^T = [0, 0, 1, 0, 0, 1]$$

$$\Rightarrow \quad W_c = [0, -1, 0, -1]$$

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

Le marquage initial de la place de contrôle est :  $W_c\_ini = 1 - 0 = 1$



**Figure3.9.** *Modèle RdP en boucle fermée*

Le contrôleur fonctionne en parallèle avec le procédé. Son rôle est de surveiller le procédé et de prendre des actions correctives pour éliminer tout comportement indésirable.

## **Chapitre 4**

# **Application de la synthèse de contrôleur inverse au problème de vérification d'affectation**

## 4.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on traitera le problème de la possibilité d'affectation des médicaments présenté précédemment avec les contrôleurs qui on la déjà calculer à partir de la matrice d'incompatibilité.

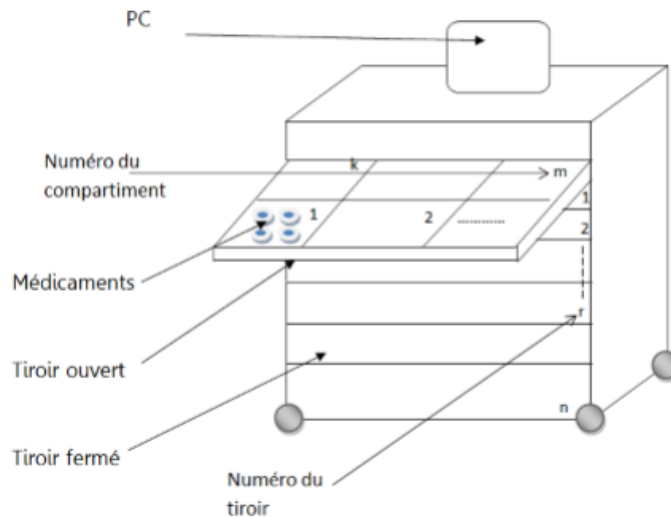
On utilisant l'approche de commande supervisée basée sur les réseaux de Pétri comme outil de génération d'exclusions mutuelles entre les médicaments incompatibles et leur compartiments respectifs, ainsi la vérification de la modélisation avec l'équation fondamental.

Deux médicaments sont dit incompatibles ou similaires quand ils présentent un risque de confusion pour les infirmiers. Et il ne faudrait pas placer deux médicaments incompatibles dans deux compartiments proches ou voisins.

Tout d'abord, on fera une modélisation inverse de la procédée de notre système d'affectation avec les contrôleurs par un réseau RdP, puis on vérifier est ce que les calculs de l'équation fondamental sont utilisable pour cette modélisation. Pour finir on traitera un exemple d'application pour expliquer mieux si on a une solution possible pour affecter un nombre fini de médicaments incompatibles dans un tiroir qui contient un nombre fini des compartiments ou pas.

## 4.2. Modélisation de système par RdP :

La démarche suivie pour résoudre le problème d'affectation passe tout d'abord par la modélisation du système de dispensation par les réseaux de Pétri est résumée par les données dans la figure ci-dessus (figure 4.1) :



**Figure4.1.** configuration de l'armoire

$n$  : le nombre de tiroirs de l'armoire

$m$  : le nombre de compartiments de chaque tiroir

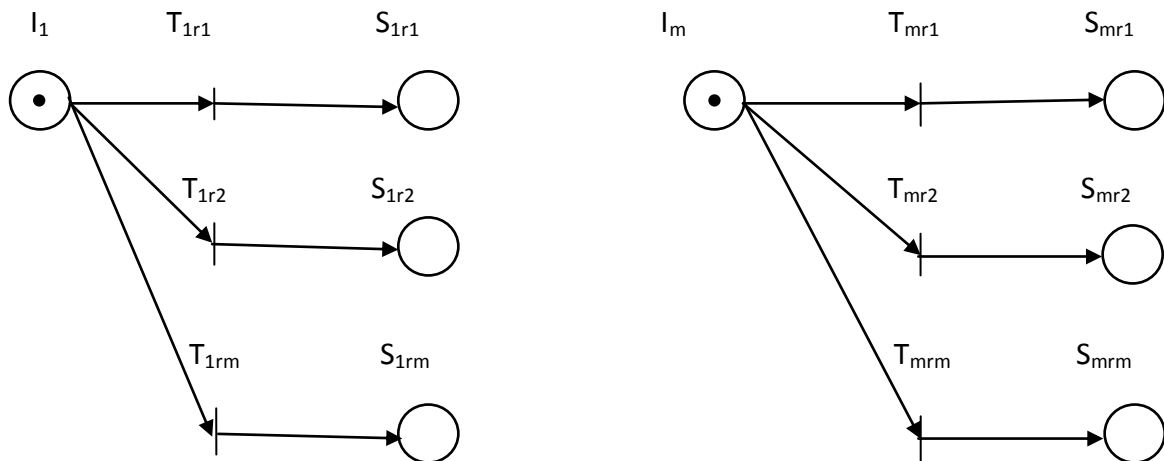
$r$  : indice des tiroirs,  $r \in [1, n]$

$k$  : indice du compartiment,  $k \in [1, m]$



Nous considérerons que le nombre de médicaments à affecter à un tiroir est égal au nombre de compartiments  $m$ .

L'affectation d'un tiroir est modélisée par une transition et le modèle obtenu est non cyclique mettant en évidence des évolutions en concurrence et en conflits (Figure 4.2). Un même médicament peut aller dans n'importe quel tiroir et deux médicaments similaires ne peuvent pas être voisins. Une affectation complète consiste à franchir chacune des transitions une fois; le réseau de Pétri doit être quasi-vivant, c'est-à-dire chaque transition est franchie ici exactement une fois. La similitude ou l'incompatibilité de voisinage est traduite en contraintes sur les marquages des places (exclusion mutuelle), elles sont déterminées à partir de la matrice de similitude. Ensuite, nous traduisons les contraintes de sélection des compartiments par le calcul de places de contrôles en se basant sur la théorie de la synthèse formelle de contrôleurs.



**Figure4.2.** *Modèle réseau de Pétri du problème d'affectation*

$I_m$  : Place du médicament  $m$  à affecter

$T_{mrk}$  : Affectation du médicament  $m$  au compartiment numéro  $k$  du tiroir  $r$

$S_{mrk}$  : Un médicament  $m$  se trouvant dans le compartiment numéro  $k$  du tiroir  $r$

### 4.3. Synthèse de contrôleur inverse :

La synthèse du contrôleur inverse consiste à la vérification de l'utilisabilité de l'équation fondamental sur la nouvelle modélisation en RdP au moins avec un marquage initial et un vecteur caractéristique d'une séquence de franchissements  $S$ , en effet cette modélisation est juste la modélisation normal d'un procédé contrôlé avec l'inverser des flèches des arcs du ce modèle, et bien sûr avec les calculs de ces nouvelles matrices.

Pour commence notre travail la premier chose qui on le fait est la modélisation de procédé contrôlé et le calcul de son marquage initial.

Le calcul de marquage initial des contrôleurs est parla synthèse qui basée sur la méthode des invariants qui consiste à ajouter une place de contrôle pour chaque contrainte. Englobant les places en exclusion mutuelle et la place de contrôle, un invariant de marquage est créé réalisant ainsi de manière simple et élégante la contrainte d'incompatibilité. Le marquage initial du modèle réseau de Pétri du contrôleur est déterminée de manière algébrique fournissant ainsi un modèle réseau de Pétri augmenté par le nombre de places, le nombre de transitions est inchangé.

Nous besoin de la synthèse de contrôleur que la modélisation et son état initial, alors Le calcul de l'état initial du contrôleur est donné par l'équation suivante :

$$Wc\_ini = b_v \cdot L^T \cdot M_{p\_ini} \quad (1)$$

Tels que :

$L^T$  : représente la matrice de pondération des contraintes

$M_{p\_ini}$ : est le marquage initial du procédé

$b_v$ : est le vecteur des bornes des contraintes

$Wc\_ini$ : est le marquage initial du contrôleur

\*Nous avons deux types de contraintes :

**Contrainte d'espace** : c'est la contrainte qui exige qu'un emplacement du tiroir est réservé à un seul médicament.

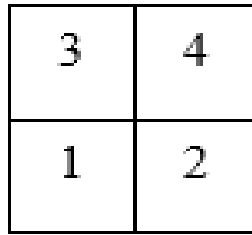
**Contrainte d'incompatibilité** : elle impose que deux médicaments incompatibles ne doivent pas être placés dans deux compartiments voisins.

**Remarque** :

Si ce modèle n'est pas quasi-vivant, alors il n'y a pas de solution au problème. Au moins un médicament n'a pas été affecté, les contraintes de similitude sont trop fortes. Dans le cas général, il peut y avoir une infinité de solutions et des critères supplémentaires doivent être ajoutés pour obtenir une solution unique. [8]

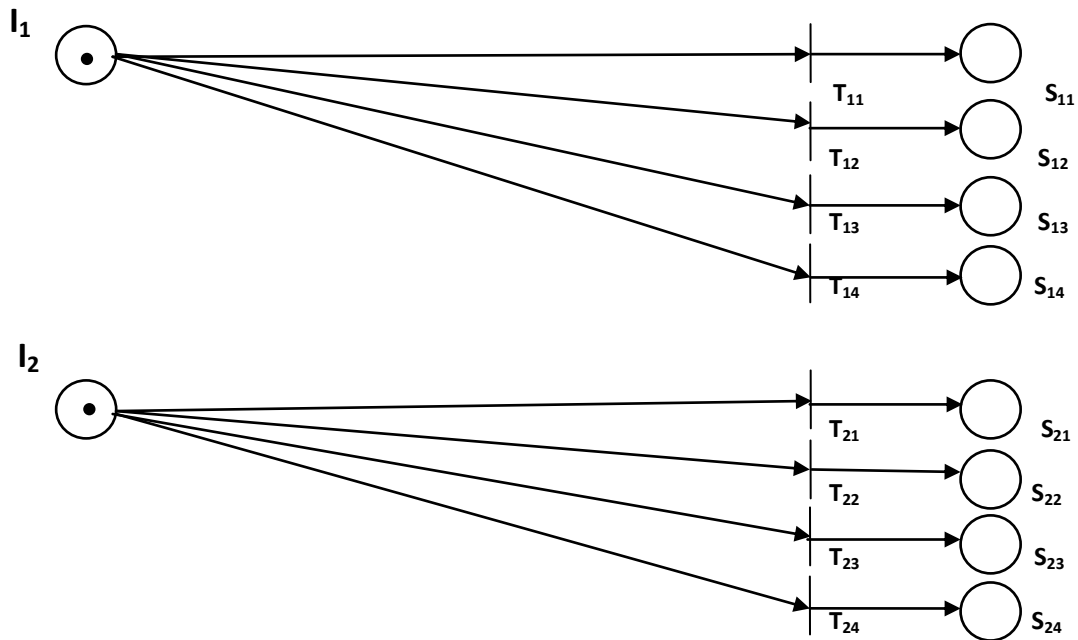
#### 4.4. Application de contrôleur inverse :

On considère un exemple simple consistant à affecter deux (2) médicaments incompatibles dans un tiroir à quatre (4) compartiments (Figure 4.3). Notons que la démarche reste valable pour tout couple de médicaments et quel que soit la taille du tiroir (nombre des compartiments).



**Figure 4.3.** *Tiroir à 4 compartiments*

Soient  $I_1$  et  $I_2$  les deux médicaments places dans n'importe quelle place du tiroir. On obtient alors le modèle RdP du procédé de la figure 4.4 conformément au modèle de la figure 4.2, mais en faisant abstraction de l'indice du tiroir (qui est inchangé dans le modèle), étant donné qu'on traite le problème d'affectation par tiroir. L'ajoute de l'indice n'apporte rien et alourdit l'écriture.



**Figure4.4.** *Modèle RdP du procédé*

L'objectif du contrôle c'est la vérification si les médicaments  $I_1$  et  $I_2$  sont placés dans deux compartiments voisins, cela veut dire que si le médicament 1 est affecté au compartiment 1 du tiroir alors le médicament 2 ne doit pas être affecté ni au compartiment 1, ni au 2 et ni au 3 du tiroir parce que ces deux derniers compartiments sont voisins au 1, ne laissant que le compartiment 4 libre pour accueillir le médicament 2.

Nous avons donc les contraintes suivantes sur le marquage du système :

$$C1 : M(S11) + M(S21) + M(S22) + M(S23) \leq 1$$

$$C2 : M(S12) + M(S22) + M(S21) + M(S24) \leq 1$$

$$C3 : M(S13) + M(S23) + M(S21) + M(S24) \leq 1$$

$$C4 : M(S14) + M(S24) + M(S22) + M(S23) \leq 1$$

Notons que l'ensemble des places et l'ensemble des transitions du modèle RdP du procédé sont notés respectivement, P et T, tel que :

$$P = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ S_{11} \\ S_{12} \\ S_{13} \\ S_{14} \\ S_{21} \\ S_{22} \\ S_{23} \\ S_{24} \end{bmatrix}' \quad T = \begin{bmatrix} T_{11} \\ T_{12} \\ T_{13} \\ T_{14} \\ T_{21} \\ T_{22} \\ T_{23} \\ T_{24} \end{bmatrix}'$$

Suivant les contraintes, on détermine  $L^T$  et  $b_v$  comme suit :

$$L^T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad b_v = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Et à partir du modèle RdP du procédé, on peut détermine le marquage initial comme suit :

$$M_{p\_ini} = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]'$$

$$W_{C\_ini} = b_v - L^T \cdot M_{p\_ini} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Le vecteur de contrôle est composé de quatre (4) places Pc1, Pc2, Pc3 et Pc4.

La figure suivante donne le RdP du procédé contrôlé :

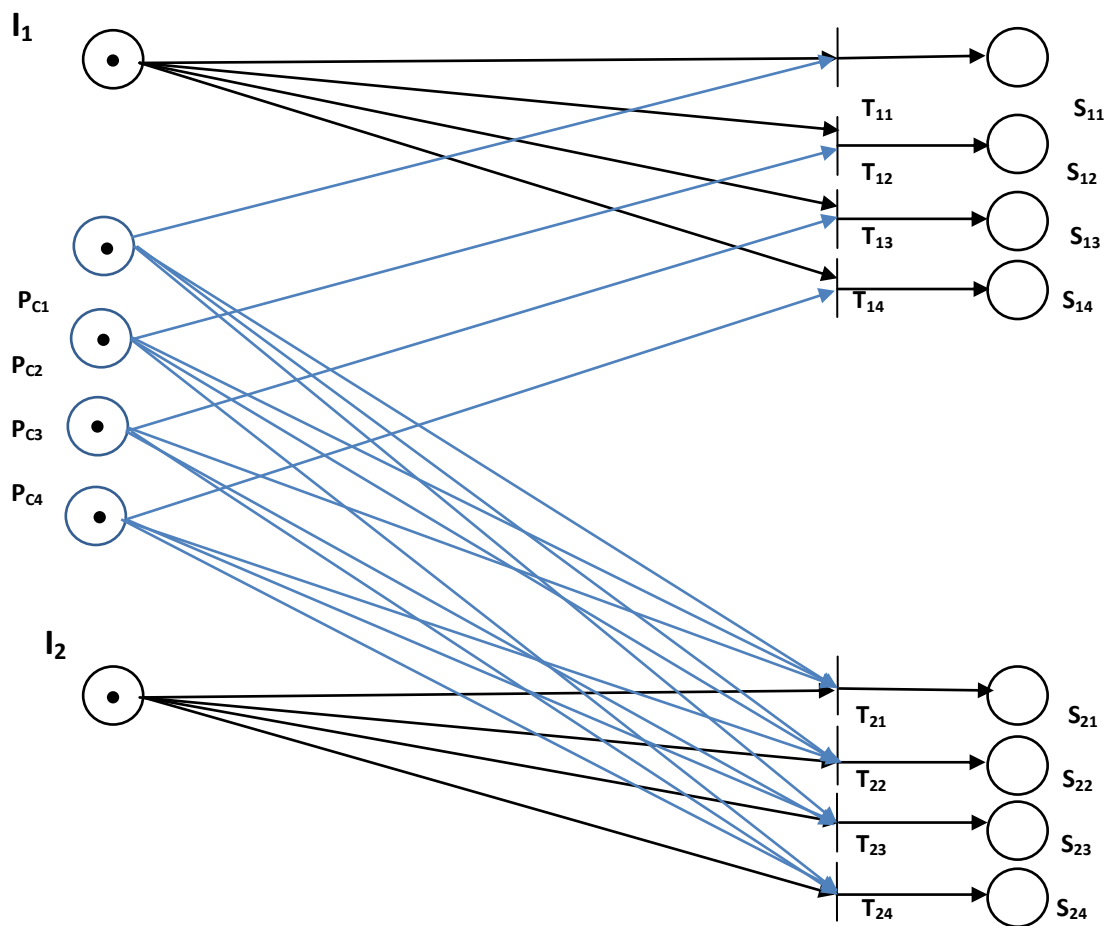


Figure4.5. RdP du procédé contrôlé(directe)

4.4.1.Application 1 :

Maintenant on inverse les flèches des arcs de ce modèle :

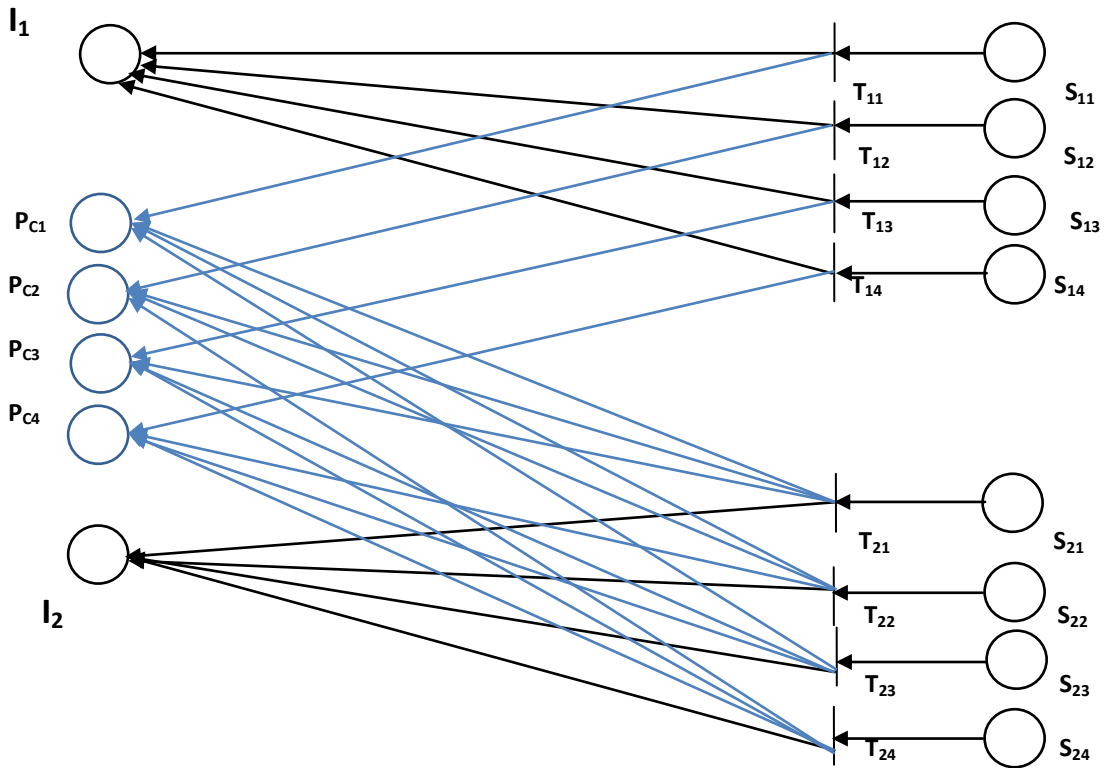


Figure 4.6. RDP du procédé contrôlé inverse

D'après ce modèle on calcul son matrice d'incidence .

La matrice d'incidence  $W_p'$  du procédé inverse est déterminée à partir du modèle RDP du procédé inverse (fig4.6) :

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

Donc pour vérifier l'affectation s'elle est possible avec ces contrôleurs ou non, à chaque fois on détermine une marquage initial et son vecteur caractéristique, puis on appliquée dans l'équation fondamental.

Si la résultat du calcule  $M_k$  nous donne un modèle RdP quasi-vivante, alors la possibilité de cette affectation est vérifiée, sinon on terminer les calcules jusqu'on trouve une résultat d'un RdP quasi-vivante, si on ne trouve aucun marquage qui doit vérifier cette possibilité alors cette affectation est impossible.

On a plusieurs vecteurs caractéristiques qui sont proposés à partir des emplacements aléatoires.

Nous allons vérifier la possibilité d'affectation (chaque colonne est un vecteur caractéristique proposée) :

$$S = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

On va essayer le calcul avec la première colonne du S avec le marquage initial:

$$M_{jni} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \bar{S} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

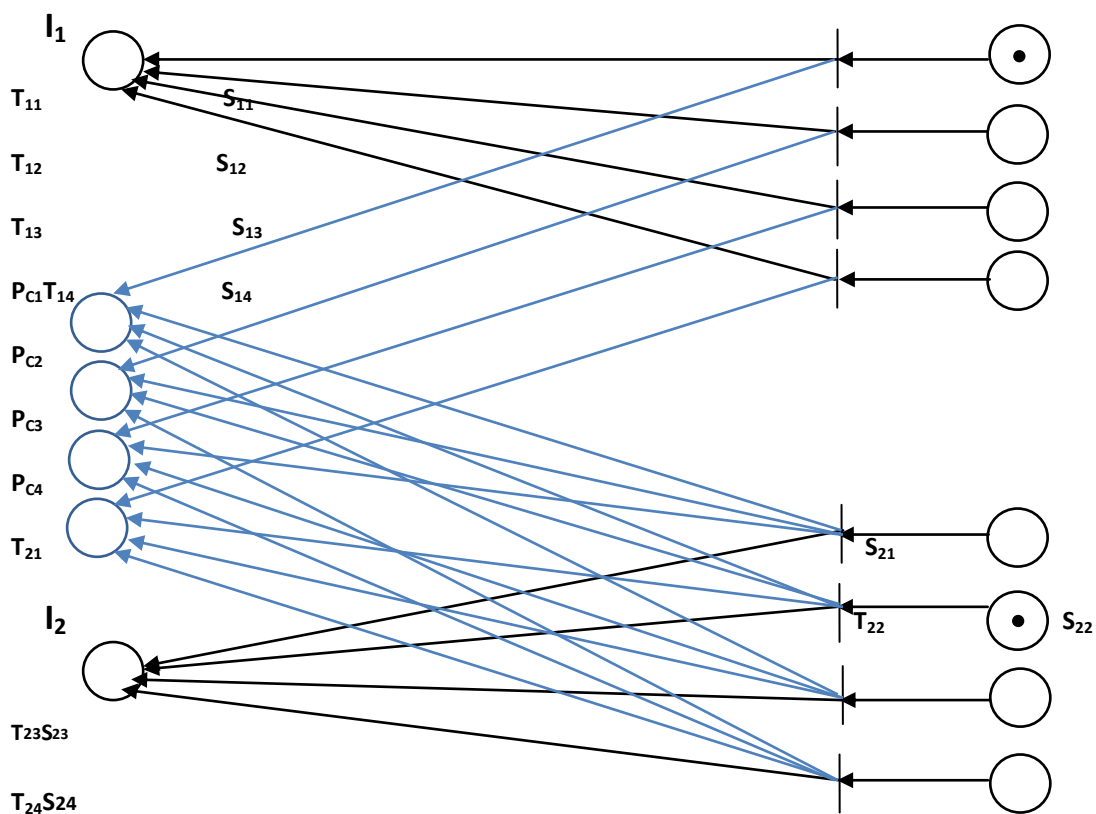


Figure4.7. ModèleRdp de l'exemple1

Alors avec ce marquage initial  $M_{jni}$  et le vecteur caractéristique de séquence  $S$  qui mène de  $M_j$  à  $M_K$  (marquage final).

On vérifie cette modèle, utilisant l'équation fondamentale suivante :

$$M_k = M_j + W_p' \cdot \bar{S} \quad (2)$$

Suivant l'équation, on trouve :



$$\begin{aligned}
 M_k' = & \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
 M_k' = & \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

**Remarque :**

On voit que  $M_k'$  n'est pas un marquage quasi-vivant, donc pour ce modèle on trouve que le placement des médicaments  $I_1$  et  $I_2$  est impossible.

On répète avec la même équation fondamentale, les autres marquages initiaux et les vecteurs caractéristiques jusqu'à ce qu'on trouve un couple qui nous donne le résultat qu'est en égalité avec le marquage final souhaité.

**4.4.2. Application 2 :**

On vérifie le couple ci-dessous sur le modèle de RdP (**Figure4.8**) avec l'équation fondamentale puis on vérifie le résultat du marquage calculé s'il est quasi-vivant.

$$M_j' = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \bar{S}' = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

L'application sur le modèle :

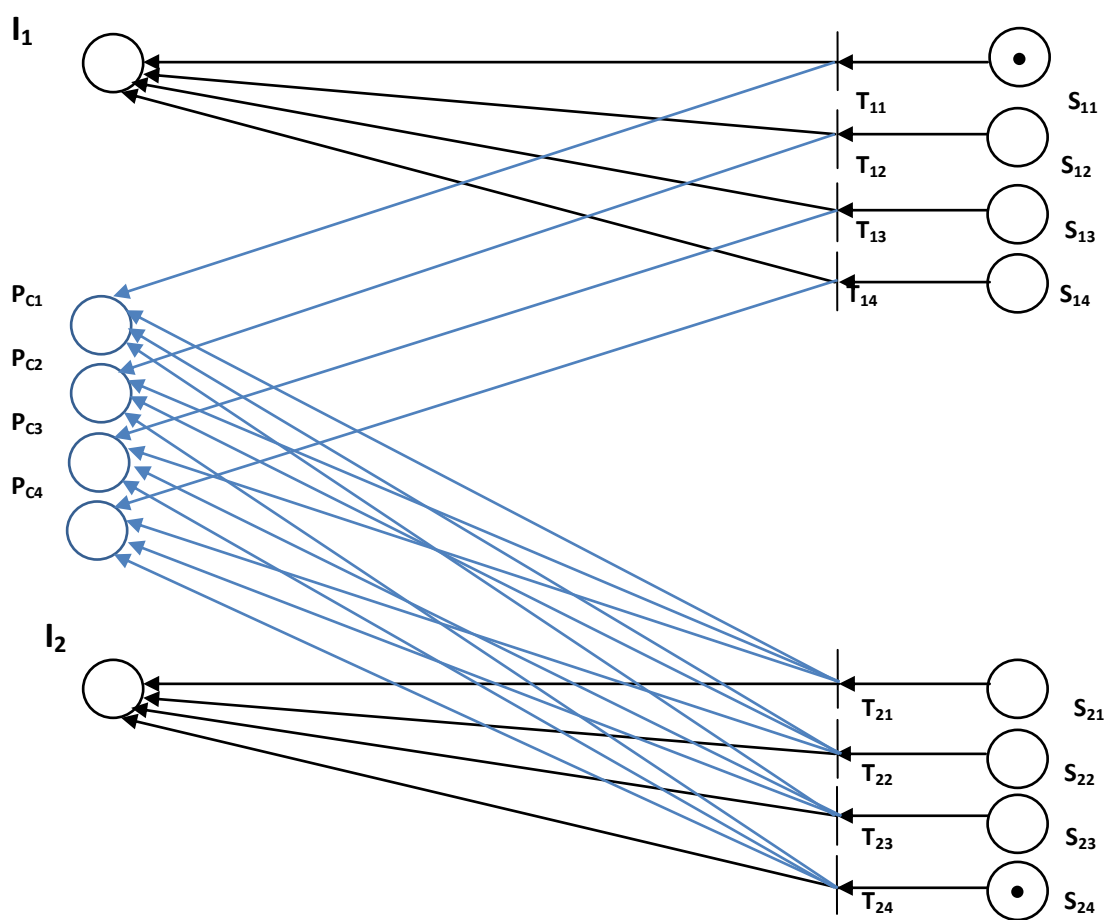


Figure 4.8. Modèle Rdp de l'exemple 2

Suivant l'application sur l'équation fondamentale, on trouve :

$$M_k'' = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

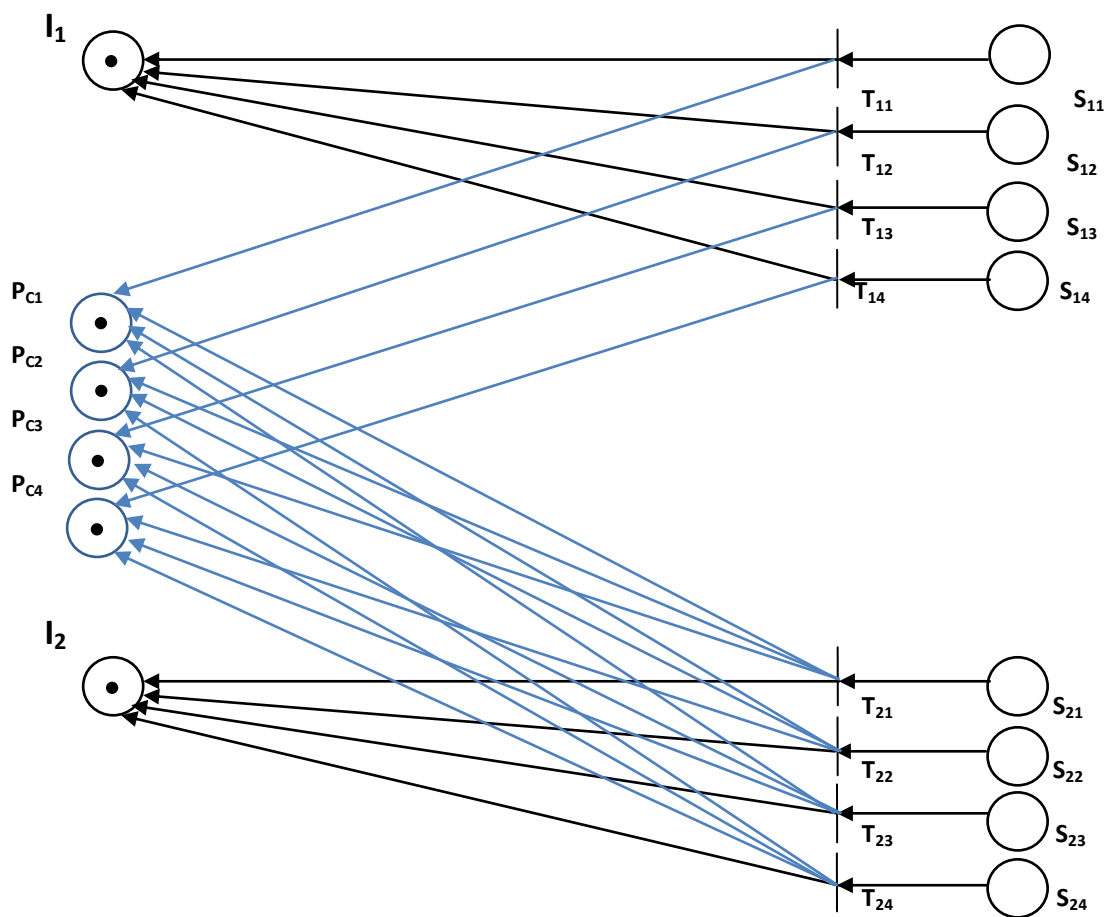


Figure4.9. RdP de l'exemple 2 après le franchissement de séquence

**Remarque :**

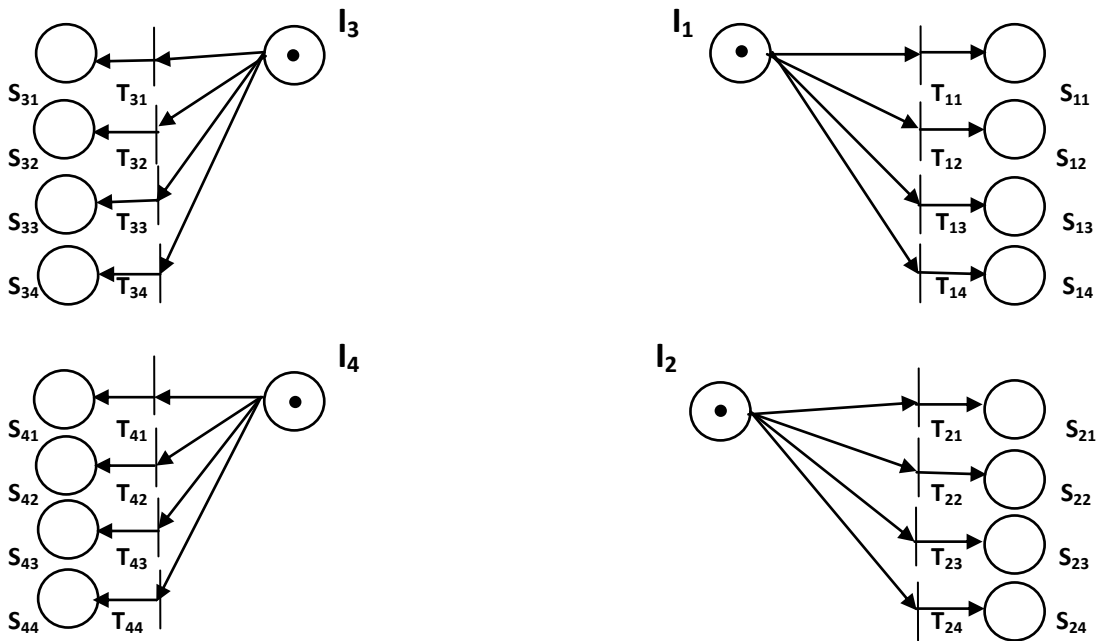
Alors on remarque ici que  $M_k$  c'est un marquage quasi-vivante, alors on arrête ici et pour cette modèle on trouve que le placement des médicaments  $I_1$  et  $I_2$  est juste, donc l'affectation des médicaments dans ce tiroir est possible.

**4.5. Exemple d'application (2 couples incompatibles) :**

On prend un exemple consistant à affecter quatre (4) médicaments dont deux (2) couples d'entre eux sont incompatible à affecter dans un tiroir de quatre (4) compartiments.

Soient  $I_1, I_2, I_3$  et  $I_4$  les quatre médicaments, et  $(I_1, I_2)$  et  $(I_1, I_3)$  les deux couples des médicaments incompatibles.

On obtient alors le modèle RdP du procédé de la figure suivante :



**Figure4.10.** Modèle RdP de L'exemple

L'objectif de ce contrôle est cherché s'il y a une solution pour placer les deux couples des médicaments ( $I_1, I_2$ ) et ( $I_1, I_3$ ) dans des compartiments qui ne sont pas voisins et affectées les autres médicaments normalement.

On définit :

- $C_i$  : le nombre de couples de médicaments incompatible inclus dans m.
- $PC_e$  : le nombre des places de contrôles pour les contraintes d'espaces.
- $PC_i$  : le nombre des places de contrôles pour les contraintes d'incompatibilité de chaque couple.

**4.5.1.Application 1 :**

On a :

$$C_i = 2$$

$$PC_e = k = 4$$

$$PC_i = (K \times C_i) = 8$$

Alors le nombre de contrôleur total :

$$PC = PC_e + PC_i = 12$$

Alors nous avons les contraintes suivantes sur le marquage du système :

Entre le médicament I1 et I2 :

$$C1: M(S11)+M(S21)+M(S22)+M(S23) \leq 1$$

$$C2: M(S12)+M(S22)+M(S21)+M(S24) \leq 1$$

$$C3: M(S13)+M(S23)+M(S21)+M(S24) \leq 1$$

$$C4: M(S14)+M(S24)+M(S22)+M(S23) \leq 1$$

Entre le médicament I1 et I3 :

$$C5: M(S11)+M(S31)+M(S32)+M(S33) \leq 1$$

$$C6: M(S12)+M(S32)+M(S31)+M(S34) \leq 1$$

$$C7: M(S13)+M(S33)+M(S31)+M(S34) \leq 1$$

$$C8: M(S14)+M(S34)+M(S32)+M(S33) \leq 1$$

Les constraints d'espaces:

$$C9: M(S11)+M(S21)+M(S31)+M(S41) \leq 1$$

$$C10: M(S12)+M(S22)+M(S32)+M(S42) \leq 1$$

$$C11: M(S13)+M(S23)+M(S33)+M(S43) \leq 1$$

$$C12: M(S14)+M(S24)+M(S34)+M(S44) \leq 1$$

$$L^T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad b = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$M_{\text{ini}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \mathbf{W}_{C_{\text{ini}}} = \mathbf{b}_v - \mathbf{L}^T \cdot \mathbf{M}_{p_{\text{ini}}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Notons que l'ensemble des places et l'ensemble des transitions du modèle RDP du procédé contrôlé inverse sont notés respectivement,  $P'$  et  $T'$ , tel que :

$$P' = [l_1 l_2 l_3 l_4 C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 C_6 C_7 C_8 C_9 C_{10} C_{11} C_{12} S_{11} S_{12} S_{13} S_{14} S_{21} S_{22} S_{23} S_{24} S_{31} S_{32} S_{33} S_{34} S_{41} S_{42} S_{43} S_{44}]$$

$$T' = [T_{11} T_{12} T_{13} T_{14} T_{21} T_{22} T_{23} T_{24} T_{31} T_{32} T_{33} T_{34} T_{41} T_{42} T_{43} T_{44}]$$

Maintenant on peut relier contrôleurs avec les compartiments avec des arcs, comme suit (figure 4.10) :

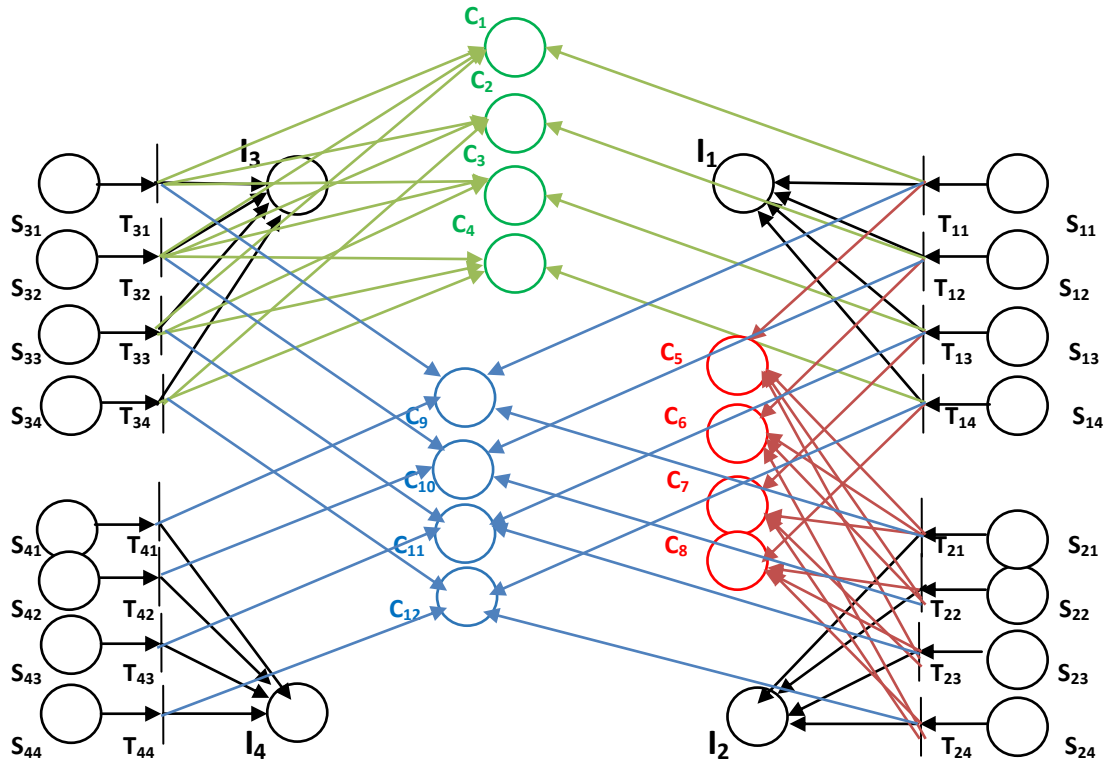


Figure.4.11. Modèle Rdp du procédé inverse.

Donc on va définir la Matrice d'incidence  $W_P$  du procédé contrôlé inverse et le marquage final du ce procédé partir du modèle RDP précédent :

La matrice d'incidence :

$$W_{p'} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

Les marquages initiaux et Les vecteurs caractéristiques dont nous allons vérifier la possibilité d'affectation (chaque colonne est un vecteur caractéristique et un marquage initial) :







■ Parmi les solutions proposées à ce problème est l'augmentation de la valeur du seuil d'incompatibilité, on applique cette solution a l'exemple précédent, on arrive à le réduit de nombre des couples des médicaments incompatibles de deux couples à un seul couple.

**4.5.2. Application 2 :**

Soient  $(I_1, I_2)$  le couple des médicaments incompatibles.

Nous avons donc les contraintes suivantes sur le marquage du système :

Entre le médicament  $I_1$  et  $I_2$ :

C1:  $M(S11)+M(S21)+M(S22)+M(S23) \leq 1$

C2:  $M(S12)+M(S22)+M(S21)+M(S24) \leq 1$

C3:  $M(S13)+M(S23)+M(S21)+M(S24) \leq 1$

C4:  $M(S14)+M(S24)+M(S22)+M(S23) \leq 1$

Entre le médicament  $I_1$  et  $I_3$ :

C1:  $M(S11)+M(S21)+M(S22)+M(S23) \leq 1$

C2:  $M(S12)+M(S22)+M(S21)+M(S24) \leq 1$

C3:  $M(S13)+M(S23)+M(S21)+M(S24) \leq 1$

C4:  $M(S14)+M(S24)+M(S22)+M(S23) \leq 1$

On a  $C_i=1$

Alors le nombre de contrôleur total :

**PC= k x (1+C<sub>i</sub>) = 8**

On obtient alors le modèle RdP du procédé inverse de la figure suivante :

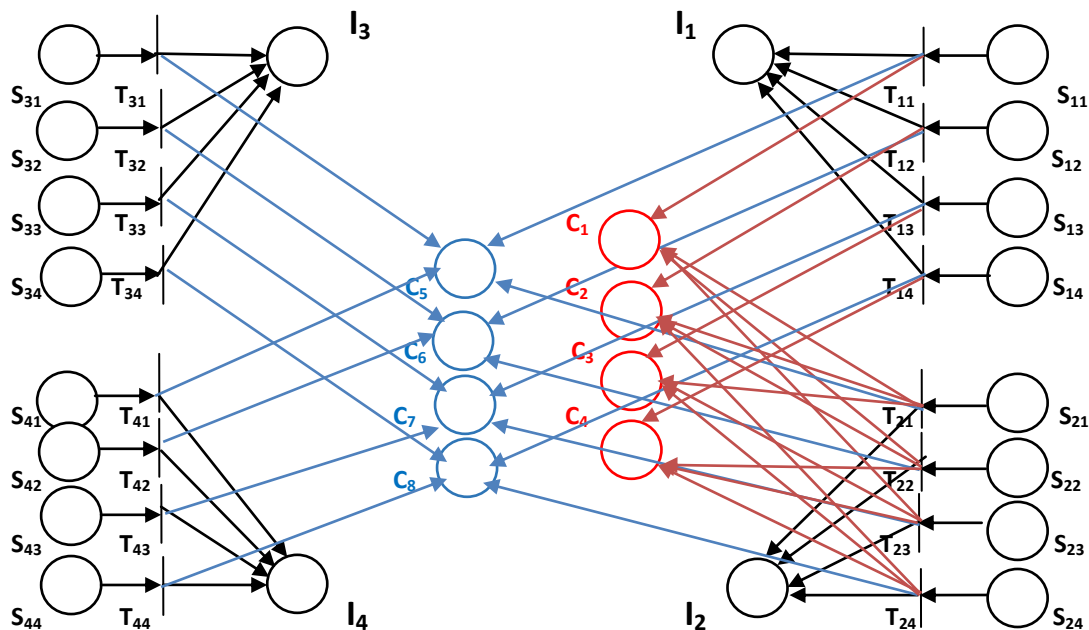


Figure4.12. Rdp de l'exemple 2 contrôlé

Notons que l'ensemble des places et l'ensemble des transitions du modèle RdP du procédé sont notés respectivement, P et T, tel que :

$$\mathbf{P}^t = [I_1 I_2 I_3 I_4 C_1 C_2 C_3 C_4 C_5 C_6 C_7 C_8 S_{11} S_{12} S_{13} S_{14} S_{21} S_{22} S_{23} S_{24} S_{31} S_{32} S_{33} S_{34} S_{41} S_{42} S_{43} S_{44}]$$

$$\mathbf{T}^t = [T_{11} T_{12} T_{13} T_{14} T_{21} T_{22} T_{23} T_{24} T_{31} T_{32} T_{33} T_{34} T_{41} T_{42} T_{43} T_{44}]$$

La matrice d'incidence  $W_p'$  du procédé est déterminée à partir du modèle RdP de l'exemple:

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

Les marquages initiaux et Les vecteurs caractéristiques dont nous allons vérifier la possibilité d'affectation (chaque colonne est un vecteur caractéristique et un marquage initial) :



Nous commençons à prendre les deux mêmes colonnes des deux matrices précédentes ( $S$  et  $M_{p\_ini}$ ) pour les appliquer à l'équation fondamentale.

Voici un exemple de calcul :

$$M_k = M_{p\_ini} + W_p \cdot \bar{S} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} + W_p \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Donc et après cette expérience, nous avons constaté qu'il est possible d'affecter ces médicaments à ce tiroir car le résultat obtenu est de modèle quasi-vivant.

**4.6. Remarque générale :**

On remarque très bien que l'affectation des médicaments et l'avoir d'un marquage final quasi-vivant qui mène à un résultat juste augmente dans le cas de la diminution des nombres des contrôleurs, ça veut dire on diminue le nombre des contraintes et on augmente le seuil.

### 4.7. Généralisation :

Dans la modélisation et l'étude de la dispensation de médicaments dans les armoires de dispensation automatisés, pour 'm' médicaments dont 'c' couples de médicament incompatible entre eux à affecter dans 'k' compartiments pour un seul tiroir on aura les modèles suivant :

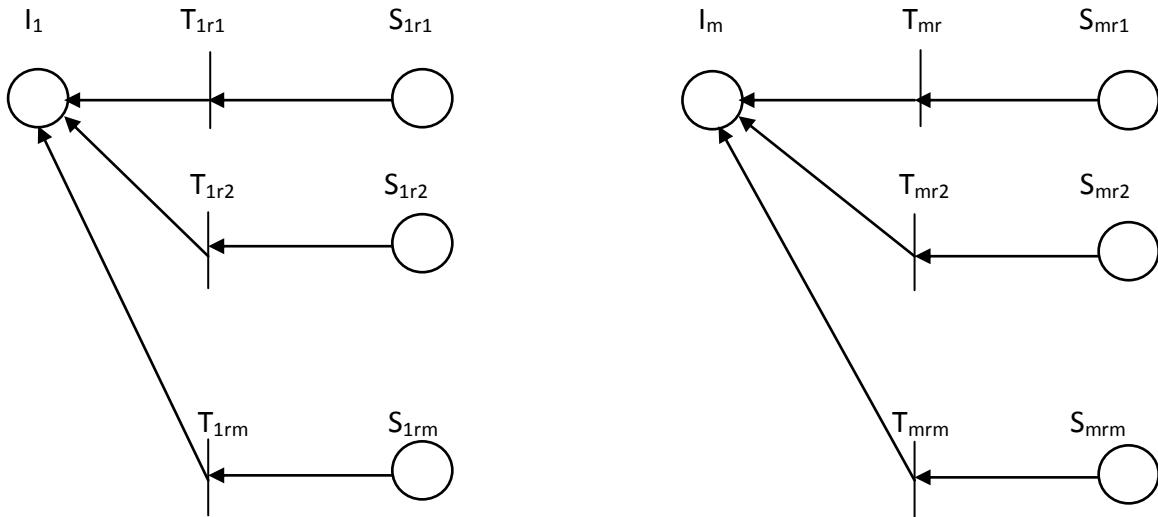


Figure.4.13. RdP du procédé inverse modélisé

Le nombre des places des contrôleurs :

$$PC=(C \times k) + k$$

Les matrices  $L$  et  $b_v$  sont déterminées à partir des contraintes avec les dimensions suivantes :

$$L = \begin{bmatrix} k * m \\ PC \end{bmatrix} b_v = \begin{bmatrix} 1 \\ PC \end{bmatrix}$$

A partir les contraintes on peut réduire les arcs de places des contrôleurs avec ses marquages.

L'ensemble des places et l'ensemble des transitions du modèle RdP du procédé contrôlé inverse notés respectivement,  $P'$  et  $T'$ , tel que :

$$P' = \begin{bmatrix} I1 \\ \cdot \\ \cdot \\ Im \\ C1 \\ \cdot \\ \cdot \\ Cpc \\ S11 \\ \cdot \\ \cdot \\ S1k \\ S21 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ Smk \end{bmatrix} \quad T' = \begin{bmatrix} T11 \\ \cdot \\ \cdot \\ T1k \\ T21 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ Tmk \end{bmatrix}$$

Le dimensionnement des matrices :

La matrice d'incidence, les vecteurs caractéristique et les matrices du marquages initiaux des procédés contrôlés inverses sont déterminées à partir du modèle RdP du ce procédé, et ayant les dimensions suivantes :

$$W_{pi} = \begin{bmatrix} PC + m * (k + 1) & k * m \end{bmatrix} \quad M_{pi\_ini} = \begin{bmatrix} PC + m * (k + 1) & 1 \end{bmatrix}$$

$$\bar{S} = \begin{bmatrix} m * k & 1 \end{bmatrix}$$

On peut connaitre ce que on peut affecter 'm' médicaments dans 'k' compartiments grâce à un algorithme qui calcule automatiquement les matrices d'incidence et final du procédé contrôlé inverse et les matrices de marquage initiaux et ses séquences de franchissements à partir d'une matrice d'incompatibilité A entre les médicaments, et après avoir définis le seuil d'incompatibilité.

			.....k
n+1	n+2	n+3	.....
1	2	3	.....n

**Figure.4.14.** tiroir à 'k' compartiments

Dans l'annexe : L'Algorithme calculant les matrices nécessaires pour pouvoir connaître la possibilité du placer ou non-placer les médicaments. On prendre à chaque fois en considération le cahier de charge (marquage initial).

# **Conclusion générale**



## Conclusion générale

La dispensation des médicaments dans le milieu hospitalier est une tâche très importante, elle fait partie intégrante du circuit du médicament, de sa fabrication à son acheminement et à son administration au patient. Une automatisation de ce procédé a été introduite par les armoires automatisées de dispensation faisant ainsi gagner aux infirmiers et aux médecins un gain de temps et d'argent. Depuis on recherche constamment à améliorer ces systèmes automatisés de dispensation et plusieurs contraintes et problèmes barrent le chemin.

Parmi les problèmes rencontrés la similitude qu'il y'a entre certains médicaments et le haut risque de confusion entre eux pouvant entraîner ainsi une administration du mauvais médicament au patient. Une méthodologie d'affectation a été introduite, celle d'affecter les différents médicaments existants aux compartiments de chaque tiroir mais en sachant qu'il existe des médicaments qu'il ne faut pas placer dans des compartiments voisins (c'est-à-dire partageant un coté) à cause du risque de confusion pouvant induire des erreurs de dispensation. Une liste de médicaments présentant des similitudes est donnée par une matrice de similitude (par couple de médicaments) ou d'incompatibilité dont les éléments valent de 0 à 1, ces valeurs signifient respectivement que les deux médicaments ne sont pas similaires ou ils le sont.

Dans notre travail, nous avons proposé une méthode de modélisation du système par les réseaux de pétri, ainsi qu'une solution du problème d'affectation inverse basée sur la synthèse de contrôleur. Notre contribution principale réside dans la résolution de ce problème de dispensation par les réseaux de pétri en créant un algorithme nous permettant de calculer les matrices qui nous permettrons d'envisager l'existence ou non d'une affectation complète de médicaments. Ce programme a permis de contrôler l'affectation d'un nombre 'm' de médicaments dans un nombre 'k' de compartiments tout en respectant la matrice d'incompatibilité.

Comme perspective à ce travail, il est envisageable d'exploiter d'autres propriétés dans la matrice d'incompatibilité des médicaments pour minimiser l'espace de recherche des solutions d'affectation.

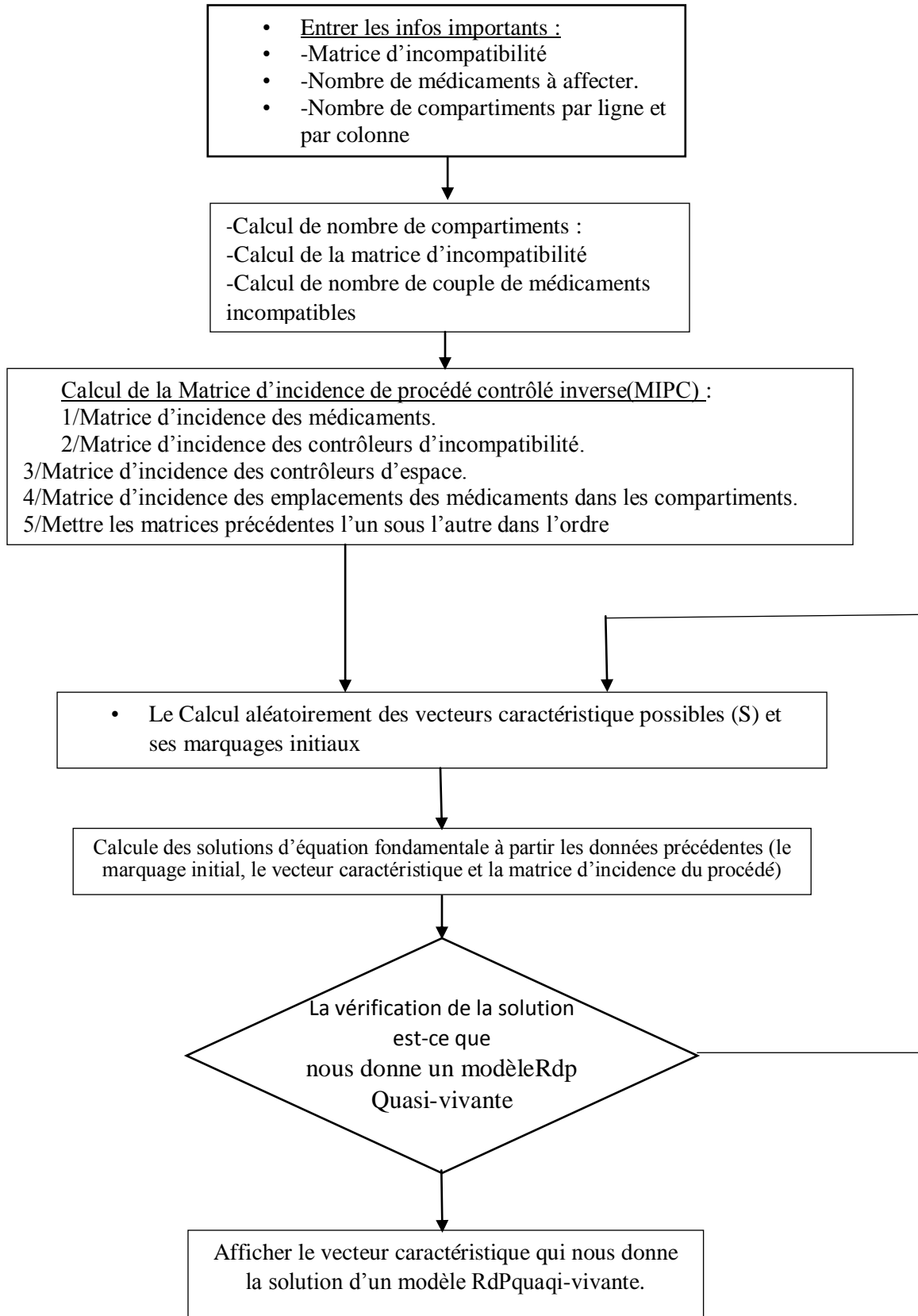
# **Bibliographie**

## Références

- [1] Jean-Yves PERON, « L'informatisation du circuit du médicament à l'hôpital. Cadre législatif et réglementaire et rôle de l'inspection de la pharmacie. », Pharmaciens inspecteurs de santé publique, Ecole Nationale de la santé publique RENNE, Date du jury : 17 Avril 2002
- [2] Pertinence des robots de délivrance automatique dans le cadre de l'introduction de la dispensation à délivrance individuelle et nominative au sein de la pharmacie hospitalière « SWISSLOG »
- [3] Mélanie DAVID-TALBOT « L'AGENCEMENT ET L'AUTOMATISATION ADAPTES A UNE PHARMACIE NOUVELLE ». Université de Nantes Faculté de pharmacie, Année 2003 N°68, Thèse pour le diplôme d'état de docteur en pharmacie, présentée et soutenue publiquement le 6 novembre 2003,
- [4] Dideban, A. « Synthèse de contrôleurs discrets par simplification de contraintes et de conditions », thèse de doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble I, 2007.
- [5] Vasiliu, A. « Synthèse de contrôleurs des systèmes à événements discrets basée sur les réseaux de Pétri », thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2012.
- [6] Article de l'arrêté du 31 mars 1999 relatif à la prescription, à la dispensation et à l'administration des médicaments soumis à la réglementation des substances vénéneuses dans les établissements de santé, les syndicats inter hospitaliers et les établissements médico-sociaux disposant d'une pharmacie à usage intérieur mentionnés à l'article L. 595-1 du code de la santé publique française.
- [7] Le référentiel de l'exercice de la Pharmacie Hospitalière : <http://adiph.org/sfpc/referentiel.html>
- [8] Hachemi, K., & Alla, H. (2013, Octobre). Affectation de médicaments dans un système automatisé de dispensation de médicaments : approche basée sur la synthèse de contrôle par réseau de petri. 8<sup>ème</sup>

# **Annexe**

## L'ORGANIGRAMME DU PROGRAMME :



## Annexe

```
%Exemple d'Affectation de six médicaments dans un tiroir à six
%compartiments
clearall
closeall
clc
A=[ 0 0 1 0 0 0; %A : matrice d'incompatibilité
    0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 1 0 0;
    0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0]
m=6;%Nombre de médicament à affecter
p=2;%Nombre de compartement par ligne
q=3;%Nombre de compartement par colonne
k=p*q;%Nombre de compartiments
%Calcul de la matrice d'incompatibilité:
fori =1:m
for j =1:m
if A(i,j)>=0.5 %seuild'incompatibilité
A(i,j)=1;
else
A(i,j)=0;
end
end
end
A=A;
c=A;
c=sum(c);
c=c';
c=sum(c);%nbre de couple de medicaments incompatibles
Nombre_de_medicaments_a_affecter=m
Nombre_de_compartiments=k
Nombre_de_couples_des_medicaments_incompatibles=c
Matrice_d_incompatibilite=A


---


Nombre_de_medicaments_a_affecter =

    6

Nombre_de_compartiments =

    6

Nombre_de_couples_des_medicaments_incompatibles =

    2

Matrice_d_incompatibilite =

    0    0    1    0    0    0
    0    0    0    0    0    0
    0    0    0    1    0    0
    0    0    0    0    0    0
    0    0    0    0    0    0
    0    0    0    0    0    0

%Calcul de la matrice d'incidence du procédé controlé inverse
```

## Annexe

`%Calcul de la matrice d'incidence des controleurs d'incompatibilité`

```

fori =1:m
for x =1:p
for y =1:q
for z =1:(c*k)
M(i,x,y,z)=0;
end
end
end
end
z=1;
while z<(c*k)+1
fori = 1:m
for j = 1:m
if A(i,j) == 1
for x = 1:p
for y = 1:q
M(i,x,y,z)=1;
M(j,x,y,z)=1;
if x>1
M(j,x-1,y,z)=1;
end
if x<p
M(j,x+1,y,z)=1;
end
if y>1
M(j,x,y-1,z)=1;
end
if y<q
M(j,x,y+1,z)=1;
end
end
end
end
end
end
end
z=z+1;
end
end
end
end
end
end
z=1;
while z<(c*k)+1
t=1;
while t<(m*k)+1
fori = 1:m
for x = 1:p
for y = 1:q
L(z,t)=M(i,x,y,z);
end
end
end
end
end
t=t+1;
end
end
end
end
end
z=z+1;
end
L=L;%Matrice d'incidence des controleurs d'incompatibilié
fori = 1:m
for j = 1:k*m
W1(i,j)=0;
end
end
i=1;
j=1;
while j<(m*k)+1
while i<m+1

```









Annexe

```
Wkk=Ww+D;%calcul d'équation fondamentale
      w=1;
while w<(m+k*(c+1+m))+1%vérification du résultat d'équation fondamentale
if Wkk(w,1)<=1
      w=w+1;
if w==(m+k*(c+1+m))
y=y+1;
Parmi_les_solutions=(G)%Affichage des solutions si elles existent
end
else w=(m+k*(c+1+m))+1;
end
end
G((5*k)+n,1)=0;
end
G((4*k)+o,1)=0;
end
G((3*k)+1,1)=0;
end
G((2*k)+h,1)=0;
end
G(k+j,1)=0;
end
G(i,1)=0;
end
if y==0
('impossible d affecter ces médicaments')
end
```

---

Parmi\_les\_solutions =

- 0
- 1
- 0
- 0
- 0
- 0
- 1
- 0
- 0
- 0
- 0
- 0
- 0
- 0
- 0
- 0
- 0
- 0
- 0
- 0
- 0
- 0
- 1
- 0
- 0
- 0
- 0
- 1
- 0

Annexe

0  
0  
1  
0  
0  
0

Parmi\_les\_solutions =

0  
1  
0  
0  
0  
0  
1  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
1  
0  
0  
0  
1  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
1  
0

Parmi\_les\_solutions =

0  
1  
0  
0  
0  
0  
1

Annexe

0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
1  
0  
0  
0  
1  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
1  
0  
0  
0  
1  
0  
0  
0  
0

Parmi\_les\_solutions =

0  
1  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
1  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
1  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
1  
1  
0  
0

Annexe

0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
1  
0

Parmi\_les\_solutions =

0  
1  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
1  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
1  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
0  
1  
0  
0  
0  
0  
1  
0  
1  
0  
0  
0  
0  
0