

UNIVERSITÉ PAUL SABATIER

## MATIÈRE

---

# - Contrôle et simulation - COMMANDE DE SYSTÈMES ( $max, +$ ) - LINÉAIRES

---

*Auteurs :*

Lucien RAKOTOMALALA

David TOCAVEN

*Encadrants :*

Euriell LE CORRONC

Laurent HOUSSIN



# Table des matières

|                                                                                           |           |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Introduction</b>                                                                       | <b>1</b>  |
| <b>1 Étude d'un système de transport</b>                                                  | <b>2</b>  |
| 1.1 Graphes d'événements temporisés . . . . .                                             | 2         |
| 1.2 Analyse, matrice d'évolution et valeurs propres . . . . .                             | 2         |
| 1.2.1 Représentation d'état . . . . .                                                     | 4         |
| 1.2.2 Irréductibilité . . . . .                                                           | 5         |
| 1.2.3 Valeur propre . . . . .                                                             | 5         |
| 1.2.4 Vecteur propre . . . . .                                                            | 5         |
| 1.3 Commande des conditions initiales . . . . .                                           | 5         |
| 1.3.1 Vecteur d'état initiaux . . . . .                                                   | 5         |
| 1.3.2 Calculs des 10 premiers trains arrivants en gare C et venant de la gare B . . . . . | 6         |
| 1.3.3 Temps inter-arrivées identiques . . . . .                                           | 7         |
| 1.3.4 Ajout d'un train . . . . .                                                          | 7         |
| <b>2 Optimisation d'une ressource dans un problème de jobshop</b>                         | <b>9</b>  |
| 2.1 Étude du problème . . . . .                                                           | 9         |
| 2.2 Modélisation des GET et représentation d'état et analyse du cycle associé . . . . .   | 9         |
| 2.2.1 Ordonnancement 1 . . . . .                                                          | 10        |
| 2.2.2 Ordonnancement 2 . . . . .                                                          | 11        |
| 2.2.3 Ordonnancement 3 . . . . .                                                          | 11        |
| 2.2.4 Ordonnancement 4 . . . . .                                                          | 11        |
| <b>3 Un problème de commande</b>                                                          | <b>13</b> |
| <b>4 Conclusion</b>                                                                       | <b>14</b> |
| <b>Annexes</b>                                                                            | <b>16</b> |
| <b>TITRE</b>                                                                              | <b>16</b> |
| TITRE . . . . .                                                                           | 16        |
| <b>Annexe 2 - TITRE</b>                                                                   | <b>17</b> |

# Introduction

# Chapitre 1

## Étude d'un système de transport

Dans cette première partie, nous allons vous présenter nos travaux sur l'étude d'un système de transport. Dans ce problème, il nous est demandé de mettre en œuvre, avec l'algèbre  $(max, +)$ , une étude d'un système de Graphe d'Événements Temporisé (GET) qui représentera notre système temporisé de transport. Nous commencerons par modéliser le procédé en GET et vous le présenter, nous effectuerons ensuite une analyse de ce système enfin essayer d'améliorer le système en modifiant ajoutant des éléments au réseau à partir de conclusion tirée sur la modélisation.

### 1.1 Graphes d'événements temporisés

Dans un premier temps, nous avons réalisé le graph des événements temporisés (voir figure 1.1). Ce graph représente les différentes gares, un couple de transition  $(x\theta1, x\theta2)$  représente la gare  $\theta$ , la première représente "le train rentre en gare", le  $t_a$  de la place suivante le temps d'attente en gare, et la seconde transition  $(x\theta2)$  "le train sort de la gare". Les  $t_a$  des places entre deux entrées ou sorties de gare représentent le temps de trajet sur une ligne de train. Les places  $xB12$  et  $xB22$  sont des copies de  $xB1$  et  $xB2$  afin de représenter les contraintes de synchronisation décrites dans l'énoncé. Afin de permettre une mise en représentation qui suivra, nous avons décomposé la place  $p0$  et la transition  $xA2$  en deux places  $p0$  et  $p18$  et deux transitions  $xA2$  et  $xA22$ . Nous avons réparti les jetons sur les deux places. Cela nous permettra de décrire les places suivantes avec un état de plus et mais uniquement par rapport à un événement précédent (" $x(k) = Yx(k-1)$ ") et non deux (" $x(k) = Yx(k-2)$ "). Voici la nouvelle représentation d'état correspondant à cette contrainte, figure 1.2.

### 1.2 Analyse, matrice d'évolution et valeurs propres

Nous abordons ici, dans l'ordre, la mise en représentation d'état du réseau de transport, l'analyse de réductibilité et le calcul des valeurs et vecteurs propres.

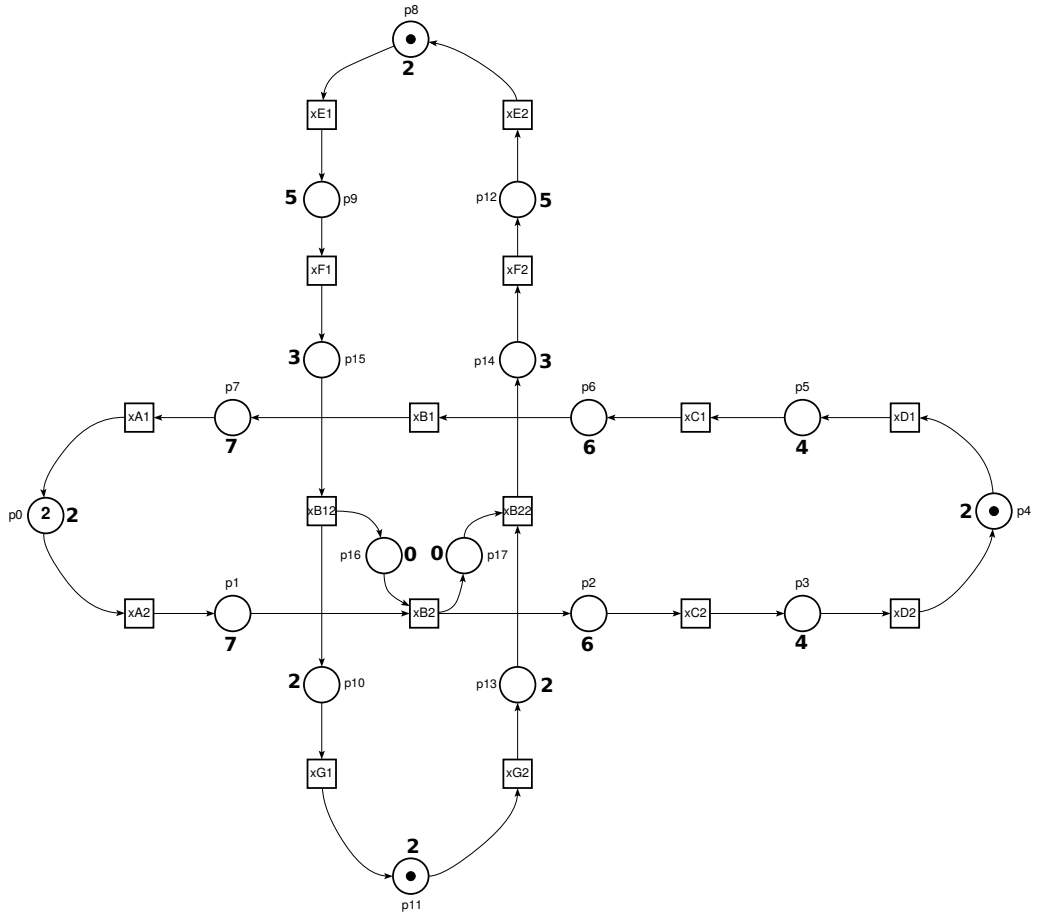


FIGURE 1.1 – Graphe des Événements Temporisé du réseau de transport

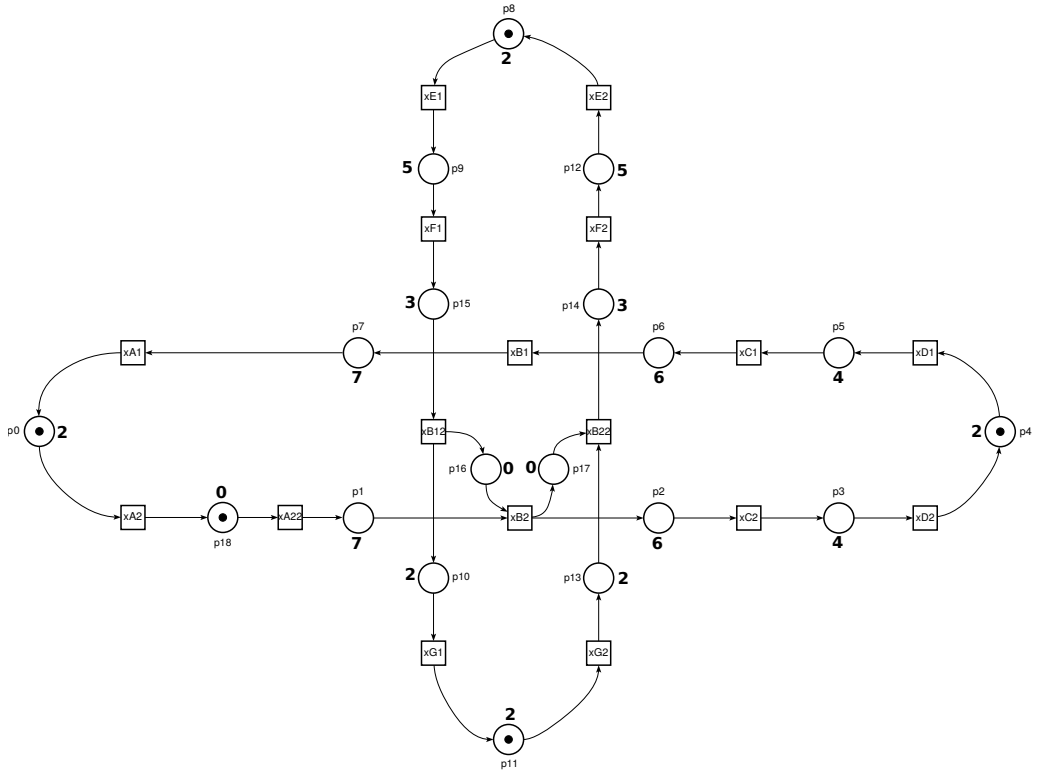


FIGURE 1.2 – Graphe des Événements Temporisé décomposé du réseau de transport

### 1.2.1 Représentation d'état

Afin de réaliser la mise en représentation d'état, nous avons extrait les égalités suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{lcl} x_{A1}(k) & = & 7x_{B1}(k) \\ x_{B1}(k) & = & 6x_{C1}(k) \\ x_{D1}(k) & = & 2x_{D2}(k-1) \\ x_{D2}(k) & = & 4x_{C2}(k) \\ x_{C2}(k) & = & 6x_{B1}(k) \\ x_{B2}(k) & = & 7x_{A2}(k) \oplus x_{B12} \\ x_{A2}(k) & = & 2x_{A1}(k-2) \\ x_{A22}(k) & = & x_{A1}(k-1) \\ x_{E1}(k) & = & 2x_{E2}(k-1) \\ x_{F1}(k) & = & 5x_{E1}(k) \\ x_{B12}(k) & = & 3x_{F1}(k) \\ x_{G1}(k) & = & 2x_{B12}(k) \\ x_{G2}(k) & = & 2x_{G1}(k-1) \\ x_{B22}(k) & = & 2x_{G2}(k) \oplus x_{B2}(k) \\ x_{F2}(k) & = & 3x_{B22}(k) \\ x_{E2}(k) & = & 5x_{F2}(k) \end{array} \right. \quad (1.1)$$

On peut remarquer que notre système est autonome, c'est-à-dire qu'il ne présente pas d'entrée ou de sortie dans l'espace d'état suivant, les matrices  $B$  et  $C$  ne sont donc pas nécessaires.

$$\left\{ \begin{array}{lcl} x(k) & = & A_0 \cdot x(k) + A_1 \cdot x(k-1) + Bu(k) \\ y(k) & = & C \cdot x(k) \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{lcl} x(k) & = & A \cdot x(k-1) \end{array} \right. \quad (1.2)$$

Ces égalités nous ont permis de créer la matrice dynamique suivante :

$$A = \begin{pmatrix} . & . & . & . & 19 & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & 12 & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & 6 & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & 2 & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & 19 & . & . & . & . & . & . & . & . & 20 \\ . & . & . & . & . & . & . & . & 15 & . & . & . & . & . & . & . & . & 16 \\ . & . & . & . & . & . & . & . & 9 & . & . & . & . & . & . & . & . & 10 \\ . & . & . & . & . & . & . & . & 2 & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ 0 & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & 2 \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & 7 \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & 10 \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & 12 \\ . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & . & 2 & . & . & . & . \\ . & . & . & . & . & . & . & . & 9 & . & . & . & 4 & . & . & . & . & 8 \\ . & . & . & . & . & . & . & . & 12 & . & . & . & 7 & . & . & . & . & 11 \\ . & . & . & . & . & . & . & . & 17 & . & . & . & 12 & . & . & . & . & 18 \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

(. signifie  $\epsilon$ )

### 1.2.2 Irréductibilité

Maintenant que nous avons une représentation d'état de notre procédé, nous allons étudier s'il est irréductible ou non, si c'est le cas, cela signifie qu'il a une unique valeur propre (c'est une implication et non une équivalence). Une des méthodes de vérification de la propriété d'irréductibilité d'une matrice est de vérifier si elle comporte une ligne ou une colonne d'éléments neutres ( $\epsilon$ ). Nous pouvons voir ici que la matrice  $A$  comporte au moins 12 colonnes d'éléments neutres, elle est donc réductible. Une autre façon est de voir si le graphe des marquages accessible est fortement connexe ou non. Si il n'est, elle est irréductible. Figure 1.3, on peut voir que ce n'est pas le cas les états 2, 3, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 14, 15 et 16 sont des états puits.

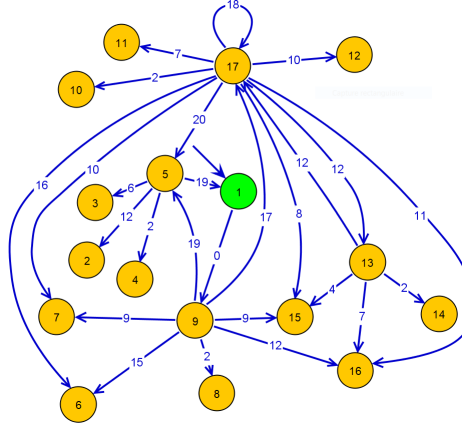


FIGURE 1.3 – Graphe des Marquages accessibles de  $A$

### 1.2.3 Valeur propre

Nous avons calculé la valeur propre à l'aide de ScicosLab, elle est unique et vaut 18. Cela veut dire que le cycle interne du système est de 18 événements une fois le régime permanent établi.

### 1.2.4 Vecteur propre

Comme précédemment, nous avons utilisé ScicosLab pour calculer le vecteur propre de  $A$ .

$$\text{vecteur}_{\text{propre}} = \begin{bmatrix} 21 & 14 & 8 & 4 & 20 & 16 & 10 & -13 & 3 & 2 & 7 & 10 & 12 & -4 & 8 & 11 & 18 \end{bmatrix}^T \quad (1.4)$$

## 1.3 Commande des conditions initiales

Dans cette partie, nous allons étudier l'évolution des trains et étudier les temps d'arrivées des trains aux différentes gares. Dans un premier temps nous créerons le vecteur d'état initial à partir de contraintes spécifiées dans l'énoncé, nous calculerons les temps d'évolutions des trains à partir de ces conditions initiales. Nous étudierons également des contraintes de synchronisation, identifierons l'amélioration du système par ajout d'un train et finalement nous évaluerons l'impact d'une modification du réseau.

### 1.3.1 Vecteur d'état initiaux

Nous avons les contraintes suivantes :

1. Un train part de la station **D** à la date **1** ;
2. Un train part de la station **A** à la date **3** ;
3. Un train part de la station **E** à la date **3** ;
4. Un train part de la station **A** à la date **7** ;
5. Un train part de la station **G** à la date **8**.



A partir de ces contraintes, nous avons calculé le vecteur initial suivant :

$$X0 = \begin{bmatrix} 18 & 11 & 5 & 1 & 21 & 17 & 11 & 3 & 5 & 3 & 8 & 11 & 13 & 8 & 11 & 14 & 19 \end{bmatrix}^T \quad (1.5)$$

Pour ce calcul, nous avons dans un premier temps placé, les temps de départ de chaque trains aux indices correspondants au départ de la gare concernée :

**Contrainte 1 :**  $X0(D1) = 1$  ;

**Contrainte 2 :**  $X0(A2) = 3$  ;

**Contrainte 3 :**  $X0(E1) = 3$  ;

**Contrainte 4 :**  $X0(A22) = 5$  (car 2 u.t déjà consommée en  $p0$ ) ;

**Contrainte 5 :**  $X0(G2) = 8$ .

A partir de ces données, nous avons calculé les valeurs des autres états en étudiant le GET.

### 1.3.2 Calculs des 10 premiers trains arrivants en gare C et venant de la gare B

Afin d'effectuer l'analyse demandé et pour avoir une vision globale des temps d'arrivées dans les autres gares, nous avons généré les 10 premiers temps d'arrivées de l'ensemble du réseau. (La petite taille du réseau rendant cette génération possible en terme de temps de calcul.)

Pour cela, nous avons initialisé un vecteur de dimension :  $\mathbb{R}^{\text{nombre d'états} \times \text{nombre de temps d'arrivé souhaité}}$ .

Ensuite, nous avons initialisé la première colonne avec le vecteur d'état initiaux et les avons calculer les suivantes dans une boucle en effectuant le calcul suivant :

$$\forall i \in \{2, \dots, 10\} | X_1 = X0, \quad X_i = A * X_{(i-1)} \quad (1.6)$$

$$\Leftrightarrow \quad (1.7)$$

$$\forall i \in \{1, \dots, 10\}, \quad X_i = X_0 * A^i \quad (1.8)$$

Les dates de départs correspondants aux trains arrivants en C et venant de B sont ceux de la ligne 7 de  $X$  :

$$L_7(X) = \begin{bmatrix} 11 & 29 & 47 & 65 & 83 & 101 & 119 & 137 & 155 & 173 \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

Voici une représentation graphique figure 1.4 (effectué à l'aide de Matlab) où nous pouvons voir que les temps de départs se stabilise rapidement car la pente est constante au bout d'un certain nombre d'événement.

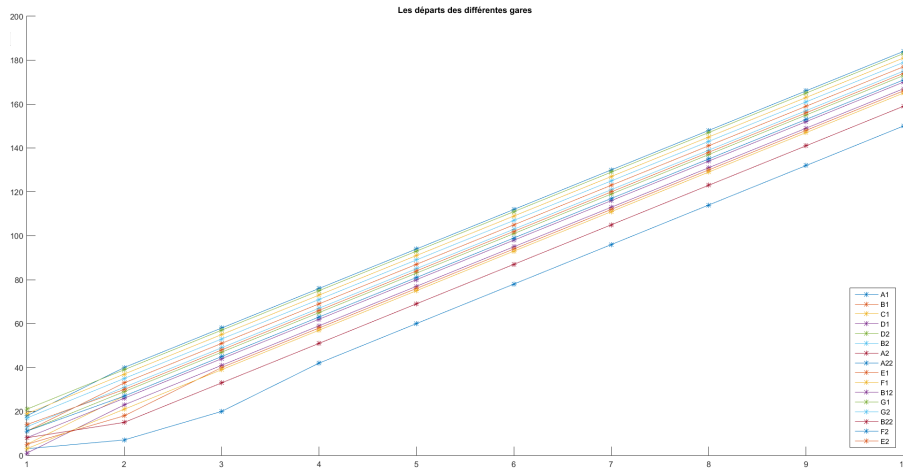


FIGURE 1.4 – Temps de départ des trains dans les différentes gares

Nous avons décidé d'étudier la différence suivante  $\Delta_{cy} = X_i - X_{i-1}$  où  $i = \{1, \dots, 9\}$ . Cela nous a permis de

calculer le nombre d'événement nécessaire à l'entrée dans le cycle périodique.

$$\Delta_{cy} = \begin{pmatrix} 22 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 \\ 22 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 \\ 22 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 \\ 22 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 \\ 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 \\ 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 \\ 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 \\ 4 & 13 & 22 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 \\ 13 & 22 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 \\ 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 \\ 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 \\ 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 \\ 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 \\ 7 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 \\ 16 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 \\ 16 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 \\ 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 & 18 \end{pmatrix} \quad (1.10)$$

Nous pouvons constater qu'à partir du 5<sup>e</sup> départs, tous les trains partent toutes les 18 u.t, cela correspond à la valeur propre et cela permet de renforcer la validité de nos calculs, de plus nous pouvons le voir graphiquement sur la figure 1.4.

### 1.3.3 Temps inter-arrivées identiques

Afin d'avoir des temps d'inter-arrivées tous identiques, nous avons refais les opérations nécessaire au calcul de  $X$  avec  $X_1 = \text{vecteur}_{propre}$ .

De cette façon, nous avons des temps inter-arrivées identiques et qui valent la valeur propre du système soit 18. Nous l'avons recalculé  $\Delta_{cy}$  et toutes les différences de temps valent 18.

### 1.3.4 Ajout d'un train

Nous devons ajouter un train afin d'accélérer le temps de cycle. Dans un premier temps, nous allons identifier le cycle à accélérer pour accélérer le réseau, ensuite nous ajouterons un train à la bonne gare et finalement nous évaluerons l'amélioration.

La valeur propre étant le temps du plus long cycle, il faut que l'on trouve le/les sous-cycle(s) qui correspond à cette durée. Cela correspond à, au départ d'un train d'un terminus, le nombre d'unité de temps qu'il faut attendre avant qu'un autre train arrive dans ce même terminus. Sur le GET, cela revient au prochain au temps écoulé entre deux tirs d'une même transition. Nous avons trouvé que c'est le trajet E-B  $\rightarrow$  B-E qui prend le plus de temps. Nous allons donc ajouter un train sur la gare E. Nous ajoutons donc un jeton en  $p8$  sur la figure 1.1. Cela donne, une fois décomposé de la même façon que la figure 1.2, la figure 1.5.

Afin de recalculer une nouvelle matrice dynamique  $A2$ , nous avons redéfinis les équations d'états de la même façon que précédemment (équation 1.11).

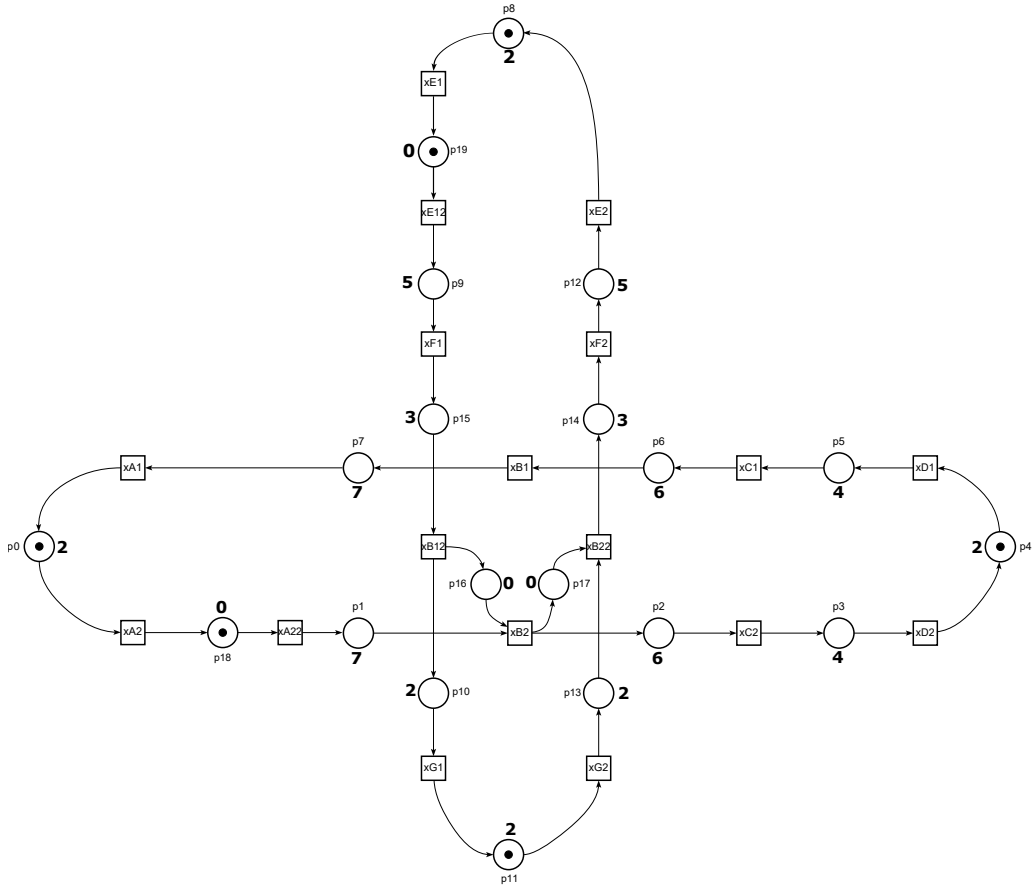


FIGURE 1.5 – Graphe des Événements Temporisé décomposé du réseau de transport avec l'ajout d'un nouveau train.

Voici les nouvelles équations d'état :

$$\left\{ \begin{array}{lcl} x_{A1}(k) & = & 7x_{B1}(k) \\ x_{B1}(k) & = & 6x_{C1}(k) \\ x_{D1}(k) & = & 2x_{D2}(k-1) \\ x_{D2}(k) & = & 4x_{C2}(k) \\ x_{C2}(k) & = & 6x_{B1}(k) \\ x_{B2}(k) & = & 7x_{A2}(k) \oplus x_{B12} \\ x_{A2}(k) & = & 2x_{A1}(k-2) \\ x_{A22}(k) & = & x_{A1}(k-1) \\ x_{E1}(k) & = & 2x_{E2}(k-1) \\ x_{F1}(k) & = & 5x_{E12}(k) \\ x_{B12}(k) & = & 3x_{F1}(k) \\ x_{G1}(k) & = & 2x_{B12}(k) \\ x_{G2}(k) & = & 2x_{G1}(k-1) \\ x_{B22}(k) & = & 2x_{G2}(k) \oplus x_{B2}(k) \\ x_{F2}(k) & = & 3x_{B22}(k) \\ x_{E2}(k) & = & 5x_{F2}(k) \\ x_{E12}(k) & = & x_{E1}(k-1) \end{array} \right. \quad (1.11)$$

La définition de  $x_{F1}(k)$  est maintenant exprimée à partir de  $x_{E12}(k)$  et celle de  $x_{E12}(k)$  à partir de  $x_{E1}(k)$ , le

reste est identique. La dimension de  $A_2$  est donc agrandie d'un état par rapport à celle de  $A$ .  
Voici la matrice dynamique  $A_2$  de notre système avec un train de plus :

## Chapitre 2

# Optimisation d'une ressource dans un problème de jobshop

Cette fois ci, nous allons nous concentrer sur la modélisation d'un problème à base de *jobshop* dans lequel nous étudierons le travail entre deux machines  $M_1$  et  $M_2$  sur deux pièces  $A$  et  $B$ . Dans un premier temps, nous modéliserons comme dans le chapitre précédent, le GET associé à notre système. Puis nous étudierons chaque marquage initial de notre graphe, selon les ordonnancement possible, afin de déterminer le cycle de temps associé de chacun.

### 2.1 Étude du problème

Le problème de cet exercice peut être décomposé en deux sous problèmes équivalents. Le premier concerne l'ordre dans lequel les pièces  $A$  et  $B$  peuvent être traités par les machines :  $A$  ne peut pas passer sur  $M_1$  tant qu'elle n'est pas d'abord passer sur  $M_2$ . Pour la pièce  $B$ , elle doit d'abord passer par  $M_1$  puis elle va sur  $M_2$ , comme cela est expliqué dans l'énoncé.

Le deuxième problème qui apparaît n'en ai pas vraiment un, il s'agit de choisir l'ordonnancement des usinages de pièces. Très naturellement, pour 2 machines et 2 pièces il vient  $2 \times 2$  possibilité d'ordonnancement qui sont :

1. **Ordonnancement 1**  $M_2 \rightarrow A$  puis  $M_1 \rightarrow A \rightarrow B$  et  $M_2 \rightarrow B$
2. **Ordonnancement 2**  $M_2 \rightarrow B \rightarrow A$  parallèle à  $M_1 \rightarrow A \rightarrow B$
3. **Ordonnancement 3**  $M_2 \rightarrow A \rightarrow B$  parallèle à  $M_1 \rightarrow B \rightarrow A$
4. **Ordonnancement 4**  $M_1 \rightarrow B$  puis  $M_2 \rightarrow A \rightarrow B$  et  $M_1 \rightarrow A$

Pour modéliser notre problème sous forme de GET, nous aurons besoin des événements qui lient les machines et les pièces entre elles. Nous pouvons obtenir ces informations à partir du tableau donné dans le sujet de TP, Ces temps d'attentes seront utilisés dans les temps d'attentes des places du GET pour modéliser le temps que met une pièce à être usiné par une machine. L'entrée d'un jeton dans une place signifie le début du traitement d'une pièce par une machine, la fin de traitement est modélisé par la fin de l'attente d'un jeton dans une place.

Les événements qui lient les machines aux pièces sont donc les liaisons  $A$  entre dans  $M_1$ ,  $B$  entre dans  $M_1$ ,  $A$  entre dans  $M_2$  et  $B$  entre dans  $M_2$ . Nous nous intéressons qu'aux entrées dans les machines car ce sont les événements les plus importants dans un système industriel. En effet les sortie dépendent des temps de traitement et des temps d'entrée : temps de sortie = temps de l'entrée + temps de traitement.

### 2.2 Modélisation des GET et représentation d'état et analyse du cycle associé

Dans un premier temps, nous avons réalisé le graphe des événements temporisés général (voir figure 2.4). Ce graph a 4 transitions (en noir) qui se retrouvent sur les intersections être une pièce et une machine qui est doit usiner la pièce. Elles correspondent, en partant de celle en haut à gauche et dans le sens horaire, à  $A$  entre dans  $M_1$ ,  $B$  entre dans  $M_1$ ,  $B$  entre dans  $M_2$  et à  $A$  entre dans  $M_2$ .

Les annotations  $A$ ,  $B$ ,  $M_1$  et  $M_2$  ne font pas partis du graph, elles font offices de légendes pour la couleurs des éléments du graph.

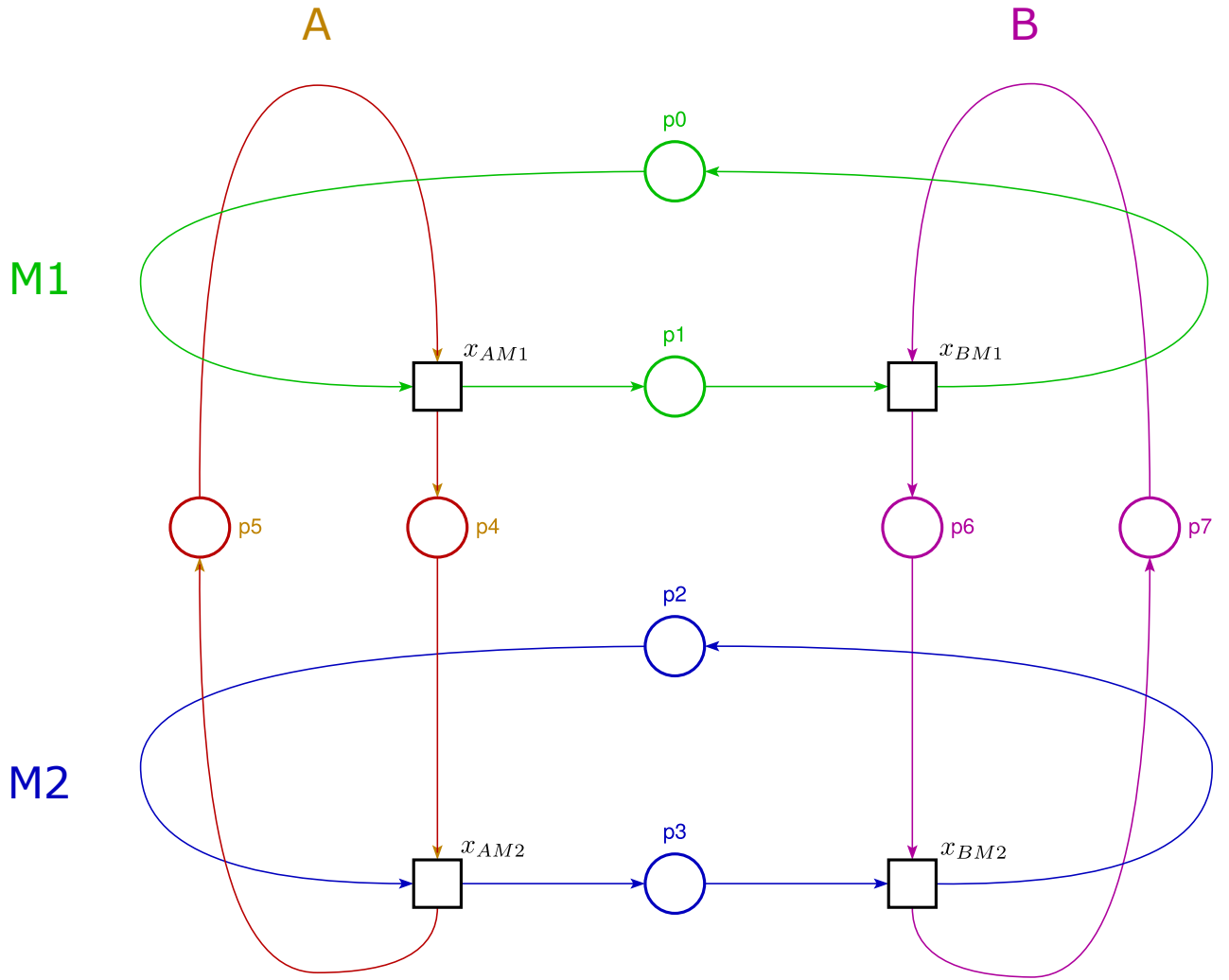


FIGURE 2.1 – Graphe des Événements Temporisé du *jobshop*

### 2.2.1 Ordonnancement 1

Nous modélisons maintenant le cas du premier ordonnancement possible décrit rapidement en 1. Dans ce cycle, la pièce *A* doit d'abord passer sur la machine *M*<sub>2</sub> puis prendre la machine *M*<sub>1</sub>. Ensuite c'est au tour de la pièce de prendre les machines *M*<sub>1</sub> puis *M*<sub>2</sub>.

Pour que la pièce *A* occupe la première utilisation de *M*<sub>2</sub>, nous devons placer le marquage initial dans les places *p*<sub>4</sub> et *p*<sub>2</sub> pour sensibiliser la transition *x*<sub>AM2</sub> et ainsi modéliser l'entrer de *A* dans la machine 2. On souhaite aussi que *A* utilise la machine 1 avant *B*, donc on empêche la sensibilisation de *x*<sub>BM1</sub> en ne mettant pas de jeton dans la place *p*<sub>1</sub> mais en plaçant un jeton dans la place *p*<sub>1</sub>. Pour que la pièce *B*

FIGURE 2.2 – Graphe des Événements Temporisé de l'ordonnancement 1 (1)

$$\begin{cases} x_{AM_1}(k) &= 10x_{AM_1}(k-1) \oplus 9x_{BM_2}(k-1) \oplus 7x_{BM_1}(k-1) \\ x_{AM_2}(k) &= 4x_{AM_1}(k-1) \oplus 3x_{BM_2}(k-1) \\ x_{BM_1}(k) &= 11x_{BM_1}(k-1) \oplus 14x_{AM_1}(k-1) \oplus 13x_{BM_2}(k-1) \\ x_{BM_2}(k) &= 20x_{BM_2}(k-1) \oplus 21x_{AM_1}(k-1) \oplus 18x_{BM_1}(k-1) \end{cases}$$

Pour pouvoir utiliser les analyse qui donne une représentation d'état suivante :

$$X(k) = \begin{pmatrix} x_{AM1}(k) \\ x_{AM2}(k) \\ x_{BM1}(k) \\ x_{BM2}(k) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 10 & \epsilon & 7 & 9 \\ 4 & \epsilon & \epsilon & 3 \\ 14 & \epsilon & 11 & 13 \\ 21 & \epsilon & 18 & 20 \end{pmatrix} X(k-1) = A_1 X(k-1) \quad (2.1)$$

Pour trouver le temps de cycle, nous proposons d'analyser le ou les valeurs propres de A. Nous obtenons avec ScicosLab et la fonction *karp* le résultat suivant :

$$\lambda(A_1) = 20$$

OBSERVATION NECESSAIRE!!!!!!

### 2.2.2 Ordonnancement 2

L'ordonnancement 2 n'est pas réalisable.

### 2.2.3 Ordonnancement 3

FIGURE 2.3 – Graphe des Événements Temporisé de l'ordonnancement 3 (3)

$$\begin{cases} x_{AM1}(k) &= 10x_{AM1}(k-1) \oplus 9x_{BM2}(k-1) \\ x_{AM2}(k) &= 4x_{AM1}(k-1) \oplus 3x_{BM2}(k-1) \\ x_{BM1}(k) &= 4x_{AM1}(k-1) \oplus 3x_{BM2}(k-1) \\ x_{BM2}(k) &= 10x_{BM2}(k-1) \oplus 11x_{AM1}(k-1) \end{cases}$$

Ce système d'équation du GET peut être représenté sous forme espace d'état avec le même vecteur que d'état que dans 2.1. Nous obtenons :

$$X(k) = \begin{pmatrix} 10 & \epsilon & \epsilon & 9 \\ 4 & \epsilon & \epsilon & 3 \\ 4 & \epsilon & \epsilon & 3 \\ 11 & \epsilon & \epsilon & 10 \end{pmatrix} X(k-1) = A_2 X(k-1) \quad (2.2)$$

Comme pour l'ordonnancement précédent, nous calculons la valeurs propres du système pour le temps de cycle :

$$\lambda(A_2) = 11$$

### 2.2.4 Ordonnancement 4

FIGURE 2.4 – Graphe des Événements Temporisé de l'ordonnancement 4(4)

$$\begin{cases} x_{AM1}(k) &= 20x_{AM1}(k-1) \oplus 19x_{BM2}(k-1) \oplus 15x_{AM2}(k-1) \\ x_{AM2}(k) &= 14x_{AM1}(k-1) \oplus 13x_{BM2}(k-1) \oplus 9x_{AM2}(k-1) \\ x_{BM1}(k) &= 4x_{AM1}(k-1) \oplus 3x_{BM2}(k-1) \\ x_{BM2}(k) &= 10x_{BM2}(k-1) \oplus 11x_{AM1}(k-1) \oplus 6x_{AM2}(k-1) \end{cases}$$

$$X(k) = \begin{pmatrix} 20 & 15 & \epsilon & 19 \\ 14 & 8 & \epsilon & 13 \\ 4 & \epsilon & \epsilon & 3 \\ 11 & 6 & \epsilon & 10 \end{pmatrix} X(k-1) = A_3 X(k-1) \quad (2.3)$$



## Chapitre 3

# Un problème de commande

Chapitre 4

Conclusion

# Annexes

## Annexe 1 - TITRE

## **Annexe 2 - TITRE**