

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

**Université de Annaba**

SAA/1552

## THESE

PRESENTEE A L'INSTITUT D'ELECTRONIQUE  
POUR L'OBTENTION DU GRADE DE MAGISTER  
EN COMMANDE AUTOMATIQUE

PAR

**SAADI Mohamed-Nacer**

### THEME

# MODELISATION D'UN MODULE TECHNOLOGIQUE ROBOTISÉ

SOUTENU le .....

DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN :

|                 |                     |                      |                        |
|-----------------|---------------------|----------------------|------------------------|
| Président.....  | <b>H. HAMAIDIA</b>  | Docteur Es-Sciences  | (Université de Annaba) |
| Rapporteur..... | <b>I. SVIRINE</b>   | Maitre de Conférence | (Université de Annaba) |
| Examineurs. /   | <b>N. ABDOULAIV</b> | Maitre de Conférence | (Université de Annaba) |
|                 | <b>M. DJEGHABA</b>  | Docteur              | (Université de Annaba) |

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

Université de Annaba

THESE

PRESENTEE A L'INSTITUT D'ELECTRONIQUE  
POUR L'OBTENTION DU GRADE DE MAGISTER  
EN COMMANDE AUTOMATIQUE

PAR

**SAADI Mohamed-Nacer**

THEME

**MODELISATION  
D'UN MODULE TECHNOLOGIQUE ROBOTISÉ**

SOUTENU le .....

DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN :

|                 |                     |                      |                        |
|-----------------|---------------------|----------------------|------------------------|
| Président.....  | <b>H. HAMAIDIA</b>  | Docteur Es-Sciences  | (Université de Annaba) |
| Rapporteur..... | <b>I. SVIRINE</b>   | Maitre de Conférence | (Université de Annaba) |
| Examineurs.     | <b>N. ABDOULAIV</b> | Maitre de Conférence | (Université de Annaba) |
|                 | <b>M. DJEGHABA</b>  | Dccteur              | (Université de Annaba) |



## AVANT -PROPOS

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au département d'automatique de l'Université de Annaba.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur IOURI SVIRINE pour m'avoir orienté dans ma tâche et qui, par sa rigueur au travail m'a beaucoup aidé à l'accomplissement de ce mémoire.

Mes vifs remerciements s'adressent à Monsieur A. HAMAIDIA pour avoir accepté de presider le jury de cette thèse.

J'adresse également mes remerciements à Monsieur N.ABDOULAIV pour la confiance qu'il m'a accordé en acceptant de participer au jury.

Mes chaleureux remerciements s'adressent à Monsieur M.DJEGHABA pour avoir accepté de juger ce travail et de participer au jury de cette thèse.

Que Messieurs V.SSORINE et M.JAROV trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance pour leur collaboration

Enfin je remercie également M<sup>elle</sup> M.KAIS et tous ceux qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

# S O M M A I R

|  |          |
|--|----------|
| Introduction Générale .....  | 2        |
| <b>Chapitre I. - présentation du Module technologique robotisé .....</b> | <b>5</b> |
| 1.1. - Introduction .....  | 6        |
| 1.2. - Systèmes de production .....                                      | 7        |
| 1.2.1. - L'atelier de type "classique".....                              | 7        |
| 1.2.2. - La chaîne de transfert .....                                    | 7        |
| 1.2.3. - L'atelier flexible .....  | 8        |
| 1.2.4. - Composition des ateliers flexibles .....                        | 9        |
| 1.2.4.1. - Les postes de travail .....                                   | 9        |
| 1.2.4.2. - Le système de manutention .....                               | 10       |
| 1.2.4.3. - Le système informatique .....                                 | 10       |
| 1.3. - Module technologique robotisé .....                               | 12       |
| 1.4. - Tâches de l'étude du module .....                                 | 16       |
| 1.4.1. - Vérification du logiciel .....                                  | 16       |
| 1.4.2. - Estimation des performances du module .....                     | 17       |
| 1.4.3. - Etude de l'influence des modifications .....                    | 17       |
| CONCLUSION .....   | 18       |
| <br><b>Chapitre II. - Réseaux de Petri - l'outil de modélisation</b>     |          |
| 11.1 - Introduction .....  | 20       |
| 11.2 - Les réseaux de Petri classiques .....                             | 22       |
| 11.2.1. - Représentation matricielle .....                               | 25       |
| 11.2.2. - Exemple d'application du RPC .....                             | 25       |
| 11.3 - Propriétés des réseaux de Petri .....                             | 27       |
| 11.3.1. - Réseau borné .....   | 29       |
| 11.3.2. - Réseau vivant .....  | 29       |
| 11.3.3. - Réseau de Petri réinitialisable .....                          | 29       |
| 11.3.4. - Réseau de Petri "bien formé".....                              | 30       |



|  |              |
|--|--------------|
| <b>Chapitre V. - Analyse des réseaux de Petri temporisés .....</b>       | <b>.....</b> |
| <b>V.1 - Introduction .....</b>  | <b>80</b>    |
| <b>V.2. - Analyse des RPT par énumération des classes d'états .....</b>  | <b>80</b>    |
| <b>V.2.1. - Organigramme de la méthode d'énumération des états .....</b> | <b>83</b>    |
| <b>V.3. - Application .....</b>  | <b>86</b>    |
| <b>V.3.1. - Analyse de la solution avec un seul robot .....</b>          | <b>87</b>    |
| <b>V.3.2. - Analyse de la solution avec deux robots R1 et R2 .....</b>   | <b>94</b>    |
| <b>Conclusion .....</b>  | <b>106</b>   |
| <b>Conclusion générale .....</b>   | <b>108</b>   |
| <b>Annexes .....</b>   | <b>111</b>   |
| <b>Bibliographie .....</b>   | <b>.....</b> |

**- INTRODUCTION GENERALE -**  
-----



Le développement de la microélectronique et l'évolution de la technologie sur le marché a permis une amélioration notable des systèmes automatisés, incitant à la conception d'outils de production à haute productivité mais également flexibles, adaptés à la production d'objets diversifiés et susceptibles d'être rapidement modifiés. Mais cette évolution s'est accompagnée d'une part par de nouvelles exigences telles que la sûreté de fonctionnement, la fiabilité, la haute productivité, etc... et d'autre part la conception de tels systèmes pose beaucoup de problème car leur taille et leur complexité sont souvent importantes.

Parmi les points soulevés lors de la conception de ces systèmes, on peut citer deux éléments qui sont considérés comme étant les plus importants.

- la preuve du bon fonctionnement
- l'évaluation des performances.

Les deux points essentiels sus-cités imposent un choix judicieux du modèle formel. De nombreux travaux ont été consacrés aux problèmes de la conception des systèmes de production et plus particulièrement à l'étude de leur aspect fonctionnel et leur aspect performance. Parmi ceux-ci on peut mentionner d'une part les Réseaux de Petri Classiques (RPC) qui sont les mieux adaptés pour représenter les mécanismes parallèles ou concurrents et d'autre part les Réseaux de Petri Temporisés (RPT) qui utilisent des méthodes d'analyse incluant le paramètre temps.

Le domaine d'utilisation des RPC et RPT est limité en pratique par les difficultés de la construction de ces modèles à partir des données technologiques et les difficultés d'analyse des modèles spécifiant les systèmes réels dans le cas où leur dimension est considérable.

Généralement ces modèles sont élaborés par des méthodes heuristiques et intuitives, de ce fait plusieurs erreurs de conception peuvent être éventuellement commises. Donc le premier problème existant en pratique, relatif à l'utilisation des RP est l'élaboration des procédures formalisées, bien organisées, de la construction des RP classiques et temporisés à partir des données technologiques. Une approche de la résolution de ce problème est proposée dans cet ouvrage.

Le deuxième problème qu'on rencontre souvent en pratique, est la grande dimension des RP des objets réels.

L'analyse directe des réseaux possédant plus de 20 à 30 noeuds par les méthodes classiques est quasiment impossible. Une solution possible peut être envisagée dans cette situation d'impasse : l'utilisation des méthodes de réductions des RP et l'automatisation des méthodes d'analyse par l'intermédiaire de l'ordinateur.

Ces approches sont développées dans le cadre de ce travail de recherche.

Une méthode formalisée de la construction des RP des objets réels est proposée. L'analyse des modèles et plus particulièrement la vérification du logiciel et l'estimation des performances temporelles sont étudiées. Il faut souligner que ces deux derniers points, quoique différents, sont résolus en utilisant le même outil formel - RP. L'application des méthodes proposées à un objet réel, "module technologique robotisé", constitue le deuxième axe principal de nos recherches.

Le premier chapitre traite des généralités de l'objet à étudier, "module technologique robotisé", considéré comme étant l'élément de base d'un atelier flexible. Les particularités de son fonctionnement (exécution des opérations en parallèle, existence des conflits, problème de synchronisation des machines et l'allocation des ressources communes, commande en temps réel) sont présentées et analysées. Ils exigent l'application des modèles spécifiques, bien adaptés à ces particularités.

Dans le chapitre II, on a fait le choix des modèles correspondants aux exigences citées en optant pour les réseaux de Petri classiques et temporisés (modèle de MERLIN). Les principales propriétés des RPC et RPT sont présentées et analysées.

Le chapitre III aborde les problèmes de la conception des modèles des objets technologiques. Une procédure formalisée de la construction des RP à partir des données technologiques est proposée. Elle est basée sur la sélection des éléments de base de la modélisation et la présentation préliminaire des données technologiques dans la forme des automates finis, de protocoles d'échange d'information entre la partie technologique et le système de commande.

La procédure proposée a été appliquée au module technologique robo.

Le chapitre IV est consacré à l'analyse des RP classiques, étape importante pour la vérification du logiciel du module à étudier. Cette analyse est basée sur l'énumération des états RPC. Un programme de construction du graphe d'états selon la méthode de KARP et d'analyse des propriétés du RPC a été élaboré en langage FORTRAN et appliquée au module à étudier.

L'aspect temporel, en particulier l'estimation des performances temporelles du module est étudié dans le chapitre V sur la base des RPT. Un programme de construction du graphe des classes d'états, utilisant l'approche de MENASHE, est conçu. Cet outil est appliqué au problème de la comparaison de deux solutions technologiques possible, utilisation soit d'un ou bien de deux robots dans la configuration du module.

Les programmes d'analyse des réseaux RPC et RPT figureront dans l'annexe de cet ouvrage.

- CHAPITRE I -

- PRESENTATION DU MODULE TECHNOLOGIQUE ROBOTISE -

La recherche constante de l'amélioration de la productivité, des conditions de travail, de la qualité des produits d'un atelier de production a engendré un développement considérable de l'automatisation. Celle-ci a touché à tous les secteurs de l'atelier, depuis la seule automatisation des postes de travail jusqu'à l'automatisation complète de l'atelier incluant la maintenance et <sup>le</sup> transport automatique des produits.

Les progrès de la microélectronique, la robotique industrielle et l'utilisation des calculateurs ont largement contribué à l'évolution de cette automatisation. C'est cette évolution qui a conduit au développement des ateliers automatisés appelés plus communément "ateliers flexibles". Cet atelier dont la particularité est d'allier une haute automatisation de la production et une faculté de fabriquer différents types de produits, couvre le domaine de fabrication de la petite et moyenne série.

Ce type de fabrication ne justifie pas la mise en oeuvre de chaînes de transfert automatiques. En effet, l'adaptation d'une chaîne à une nouvelle production est une opération longue et coûteuse. Aussi, les chaînes de transfert étant des outils de production rigides et nécessitant de gros investissements, elles ne peuvent être donc rentabilisées que pour de grandes séries. Or, il faut remarquer que la fabrication en petites et moyennes séries représente une part prépondérante (souvent donnée de l'ordre de 70 %) de la production industrielle. Une part qui semble encore devoir augmenter dans les années à venir, car elle est plus en plus nécessaire de diversifier les produits offerts au public pour des raisons de compétitivité. Pour ce type de production, cette diversité impliquant jusqu'à une période récente l'utilisation de moyens peu automatisés, ce qui se traduisait dans <sup>la</sup> majorité des cas par une faible productivité des ateliers, liée surtout aux temps morts de préparation et réglage.

Une automatisation poussée des ateliers permet d'augmenter le taux d'engagement des machines et de diminuer les temps morts dus d'une part à la préparation des machines et d'autre part à la mauvaise synchronisation des outils de production et de la mauvaise distribution des ressources communes comme le système de transport.

Deux exigences que l'on peut considérer comme étant opposées se posent lors de la phase de la conception des systèmes à haute automatisation :

- assurer une bonne sûreté de fonctionnement
- assurer une haute productivité

Ces problèmes sont difficiles à analyser à cause de la complexité du fonctionnement de tels systèmes. Les particularités de ce fonctionnement seront abordées dans ce chapitre.

## 1.2. - SYSTEMES DE PRODUCTIONS :

Généralement il existe deux grands types de production :

- La production de petites et moyennes séries qui est réalisée à l'aide d'ateliers de types "classiques" ;
- la production de grandes séries qui utilise les chaînes de transfert.

### 1.2.1. - L'ATELIER DE TYPE CLASSIQUE :

Ce type d'atelier est constitué de machines peu spécialisées.

Les différentes opérations (chargement et déchargement des pièces, manutention, assemblage, contrôle de qualité, réglage etc...) nécessitent une participation importante de l'opérateur humain. A cause de la présence de l'opérateur humain avec sa capacité immense de changer vite les programmes d'actions, cet atelier se caractérise par une grande souplesse d'adaptation et un taux relativement faible d'engagement des machines. En effet, dans les ateliers de mécanique les plus productifs (mais non automatisés) le temps d'utilisation des machines (appelé "temps copeaux") ne dépasse pas 20 % du temps de travail de l'atelier. Les 80 % restants correspondent aux opérations de réglage, de maintenance ou tout simplement aux temps morts résultant de l'absence de produit disponible. De la même manière, on estime que seulement 5 % du temps de présence dans l'atelier sont utilisés aux opérations d'usinage proprement dites. Le reste du temps, c'est à dire 95 %, se répartit entre les opérations de manutention et de stockage intermédiaire dans l'atelier, allongeant ainsi les délais de fabrication et augmentant les coûts indirects (frais financiers dus aux coûts de stockage). D'autre part, si l'on veut utiliser ce type d'atelier pour produire de la moyenne série, on est amené à produire pour lots. Ce type de production est utilisé pour réduire le temps de changement dûs au réglage machines et au changement d'outils, donc pour améliorer l'engagement des machines. Mais elle entraîne des niveaux d'encours et de stocks relativement élevés donc, des coûts supplémentaires.

### 1.2.2. - LA CHAÎNE DE TRANSFERT (LEV. 82) :

C'est un outil de production très spécialisé, constitué d'une suite de machines spécialisées adaptées à la production de un ou deux types de produits. La chaîne de transfert peut être partiellement ou totalement automatisée.

Ce type de processus se caractérise donc par une productivité élevée (forte automatisation) mais par une souplesse d'adaptation très limitée, voire nulle suivant les systèmes. En effet, l'outil de production étant conçu pour un ou deux types de produits, il est très rigide. Les délais et coûts d'adaptation de la chaîne de transfert à un nouveau type de produit sont très élevés.

La chaîne de transfert n'est donc pas une solution pour les moyennes séries qui ne justifient pas de tels investissements.

### 1.2.3. - L'ATELIER FLEXIBLE :

Pour augmenter le taux de productivité et l'adaptation des machines à la production des produits diversifiés une solution, alternative aux systèmes traditionnels, s'impose : augmentation de l'automatisation des ateliers existants en appliquant d'une façon adéquate les progrès de l'informatique industrielle et de la microélectronique. L'atelier flexible s'est avéré comme étant l'outil de production qui obéit aux critères souhaités.

Les ateliers flexibles sont des systèmes fortement automatisés, utilisés pour la fabrication de la petite et moyenne série de produits manufacturés, leur production est variée. Ils peuvent traiter simultanément différents types de produits appartenant généralement à une même famille et possèdent des caractéristiques communes.

Le domaine d'application des ateliers automatisés est très vaste (prin 81) (fig. 1).

Taille de la série

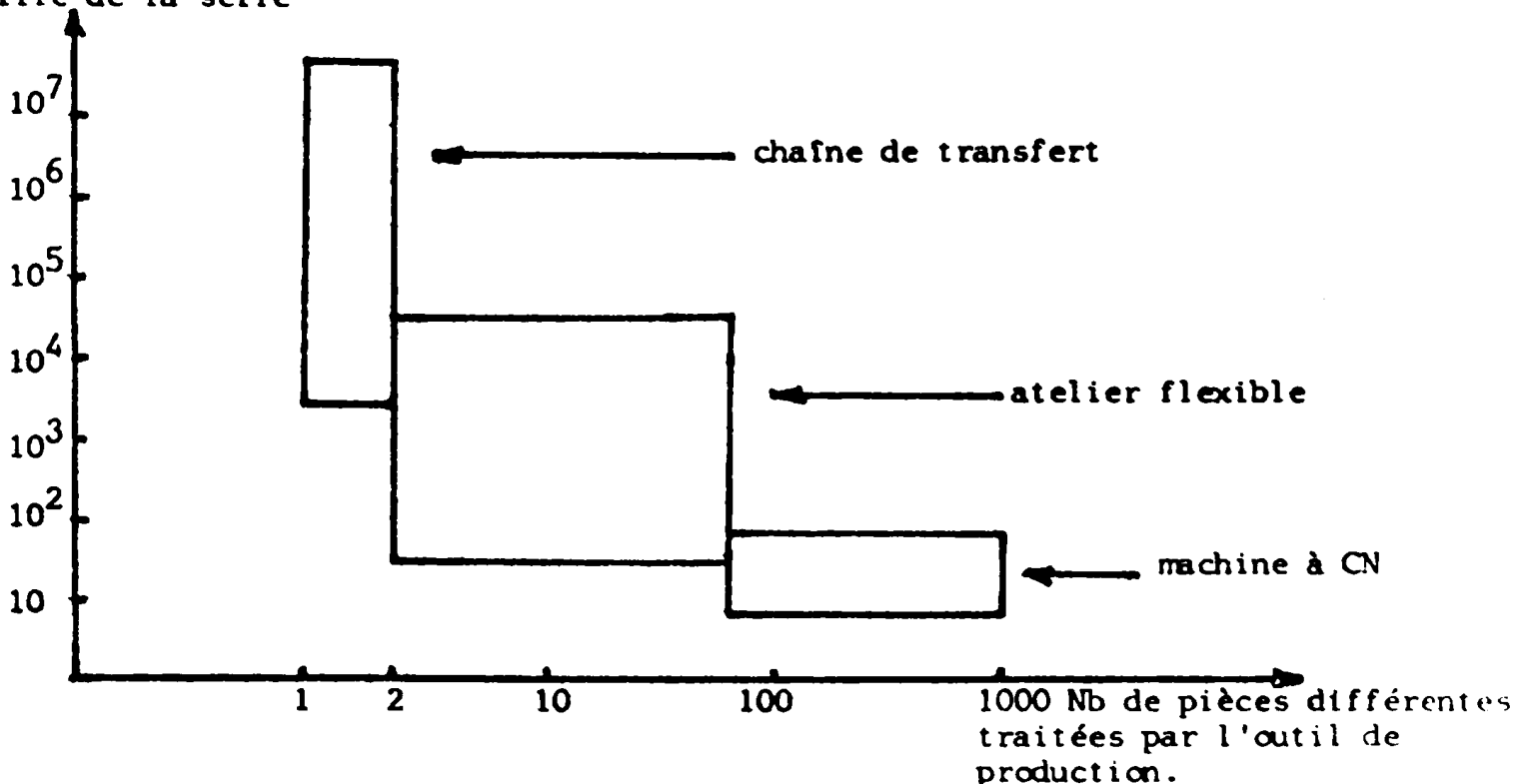


Fig. 1.1 - Champ d'application des différentes techniques d'automatisation

#### 1.2.4.2. - LE SYSTEME DE MANUTENTION :

Le système de manutention assure le transport des pièces entre les différents composants de l'atelier. Le transport doit s'effectuer d'une façon automatique. Il existe plusieurs systèmes de transport :

- système de tapis roulant ;
- chariots tractés par des chaînes enfouies dans le sol ;
- système de chariots autonomes. Ces chariots sont guidés par un réseau constitué par des rails, des fils noyés au sol (chariots filoguidés).

Le système de manutention peut avoir des fonctions secondaires autres que la fonction principale qui est la circulation des produits. Il peut assurer par exemple le stockage et le déstockage des produits en attente de machine, soit parce que celle-ci est déjà occupée, soit parce qu'elle est temporairement hors service. Les aires de stockage sont donc étroitement liées au système de manutention, elles peuvent être affectées ou non à un poste de travail. On peut considérer aussi les zones de stockage d'entrée pour les ébauches et produits semi-finis et celles de sortie pour des pièces terminées. D'autre part, le système de manutention peut être directement utilisé pour y effectuer des opérations. En effet, les opérations de chargement, déchargement ou de repositionnement sont quelque fois effectuées directement sur le réseau de transport sans utiliser de poste de travail spécifique.

Enfin le système de manutention peut assurer le déplacement des outils à l'intérieur de l'atelier soit d'une machine à une autre, soit d'un magasin d'outils à une machine et vice-versa.

Il faut souligner l'importance de la sûreté de fonctionnement du système de manutention. L'apparition de pannes dans ce système provoque un blocage complet de la manutention et par conséquent de l'atelier.

#### 1.2.4.3. - LE SYSTEME INFORMATIQUE :

Le rôle du système informatique consiste à effectuer le pilotage et le suivi en temps réel de l'ensemble du système de production. Il est constitué le plus souvent d'un calculateur central relié à des calculateurs décentralisés. Le système possède des bases de données contenant des informations précises telles que les gammes opératoires et des algorithmes de gestion de l'atelier. De plus, il assure une fonction de contrôle en mesurant l'état de l'atelier. Fort de toutes ces données (permanentes et évolutives) il assure donc la fonction de commande.



Les principales fonctions du système informatique sont les suivantes :

- contrôle de l'état des produits en cours (opération restant à effectuer, position géographique de la pièce) ;
- vérification de la qualité (détection des pièces défectueuses) ;
- contrôle de la composition des stocks ;
- connaissance de l'état du réseau de transport (encombrement du réseau, éléments défaillants, position et état des chariots...) ;
- contrôle de l'état des machines (occupée, libre, en panne) ;
- connaissance de l'identité des pièces à l'entrée des machines ;
- contrôle de la qualité et de l'état des outils (usés, cassés) ;
- mémorisation du passé de l'atelier pour améliorer la gestion à l'aide de ces données ;
- communication avec l'opérateur
  - \* rapporter l'état du système en temps réel (visualisation géographique du système)
  - \* rapporter tous les incidents, problèmes, pannes.

Les fonctions de commande sont les suivantes :

- déterminer les séquences de lancement des produits ;
- affecter les produits aux palettes ;
- gérer le système de maintenance en fonction de l'état des produits et du système de transport, des données et des algorithmes de gestion implantés ;
- fournir les instructions nécessaires pour effectuer le travail de telle machine sur telle pièce à partir de données permanentes ;
- diriger les opérations d'entrée-sortie des produits sur les machines
- gérer les files d'attente afin de choisir le produit à affecter sur les machines en fonction de l'état du système et d'algorithmes de gestion connus et implantés ;
- gérer les outils (transport, affectation, rangement) ;
- fournir un système de communication avec un opérateur pour intervenir directement dans la gestion du système.

Cette liste de fonctions du système de commande - contrôle n'est pas exhaustive et varie suivant les cas d'application, dans tous les cas cette liste détermine le cahier de charge du système de commande.

### 1.3. - MODULE TECHNOLOGIQUE ROBOTISE :

Comme cela a déjà été souligné auparavant, le principe de la modularité est une des idées générales de conception d'atelier flexible, cela permet de sélectionner en fonction de l'objet à étudier un module technologique et l'examiner de la manière la plus profonde. Sous certaines conditions il peut être considéré comme un objet autonome dont le fonctionnement ne dépend pas de celui des autres modules et en particulier si la période de travail est fixée à un jour et lorsque le plan de fabrication a été déjà établi, de même que les produits semi-finis ont été stockés avant l'exécution d'un travail bien défini.

D'autre part, l'étude d'un tel module sera utile et intéressante s'il possède des propriétés communes à tous les outils de production assez largement rencontrés en pratique.

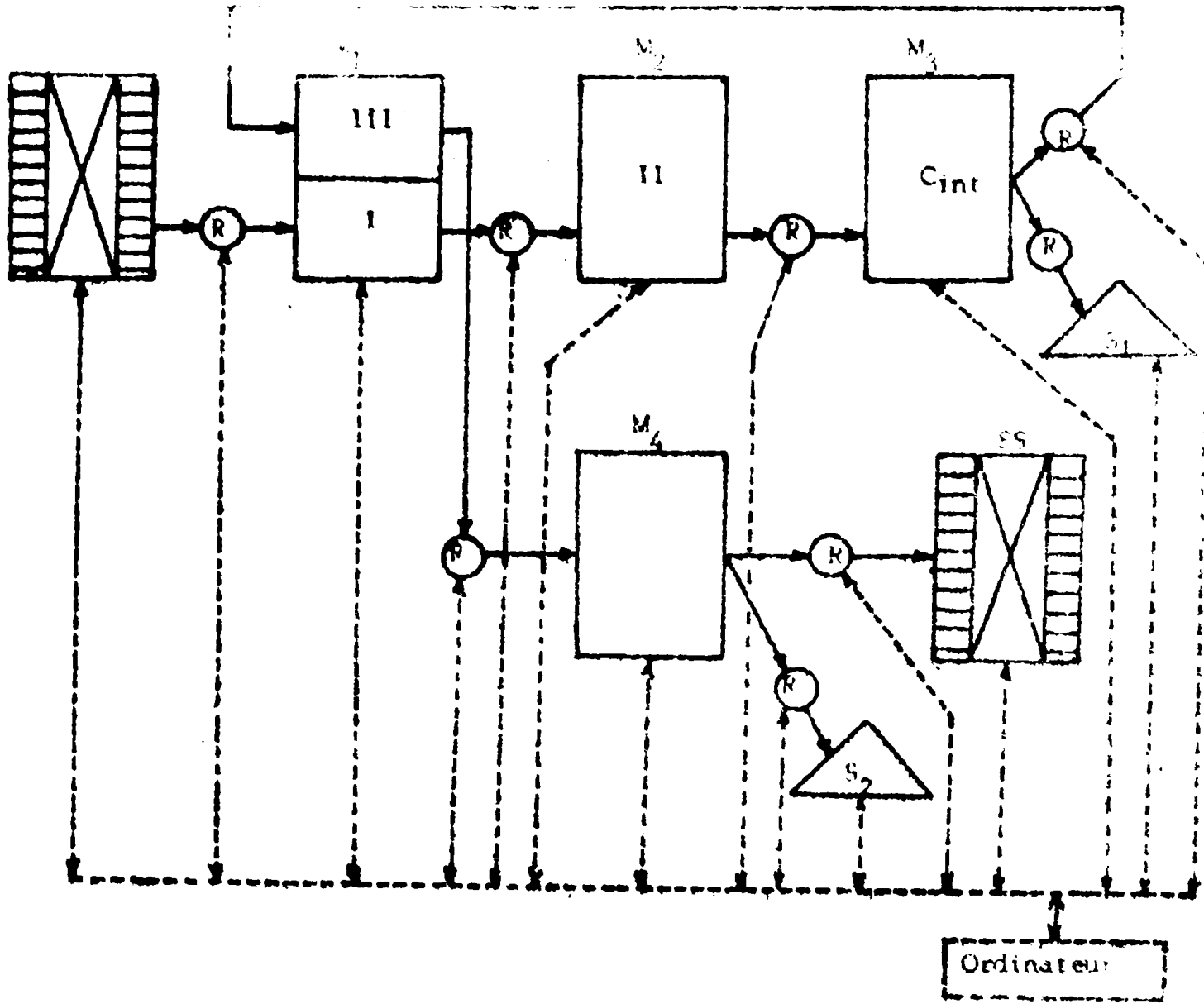
Nous présentons dans ce paragraphe un type de module technologique, considéré comme module de base, avec d'une part les structures différentes possibles (flow shop etc...) et d'autre part, les différents régimes de fonctionnement et les situations réelles correspondantes (conflit, blocage, panne, pièces défectueuses, etc...).

En prenant en considération ces remarques, on choisit en guise d'objet à étudier le module technologique (fig. 1.2) dont les différentes composantes sont :

- un stock d'entrée ;
- un stock de sortie ;
- quatre machines-outils à commande numérique ;
- deux stocks de produits rebuts ;
- un système de transport robotisé ;
- un calculateur central qui assure les tâches d'ordonnancement en temps réel et la coordination de celles-ci entre les différents moyens locaux.

On suppose que la conception et les structures possibles de l'implantation du module ont fait l'objet d'une étude antérieure, en particulier une solution a été proposée pour le système de transport dont les tâches de manutention, de transfert des pièces entre les différentes machines de l'atelier sont assurées par un robot.

On suppose aussi que le cahier des charges, correspondant à l'élaboration du produit fini, a été constitué et l'algorithme de commande du système a été construit, comme résultat, toute la documentation nécessaire (description de l'itinéraire technologique des pièces, les règles du choix des décisions, les protocoles d'échange d'information entre les machines et l'ordinateur, etc..) est connue.



SE - stock d'entrée (stockage des produits semi-finis)

SE - Stock de sortie (stockage de produits finis)

I, II, III - Phase de traitement

M1, M2, M3, M4 - Machines outil à commande numérique

C<sub>int</sub>, C<sub>fin</sub> - opération de contrôle intermédiaire et final

S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> - Stocks de produits rebuts

R - Robot transporteur

Remarque : Les phases I et III sont exécutées par la machine M<sub>1</sub>, la phase III est prioritaire.

Fig. 1.2. - Structure typique d'un module.

Le module à étudier possède toutes les caractéristiques typiques d'un atelier flexible réel à savoir :

- Structure technologique différente

\* en série : une pièce passe successivement par les machines  $M_1$  (I)  $M_2$  (II),  $M_3$  (Cint),  $S_1$ .

\* Bouclé : Une pièce passe par la chaîne  $M_1$  (I) ---)  $M_2$  (II)---)  $M_3$  (Cint) ---)  $M_1$  (III)

\* Partagé : Une pièce à la sortie de  $M_4$  a deux possibilités :  $M_4$  (Cfin) ---)  $S_5$  et  $M_4$  (Cfin) ---)  $S_2$ .

Il faut noter que dans notre cas, l'itinéraire des pièces est linéaire. Une machine peut exécuter deux tâches différentes (machine  $M_1$ ). Cette situation peut présenter un phénomène de blocage au niveau de l'entrée de la machine  $M_1$  due à la présence de deux flux de pièces d'où la nécessité de prévoir et concevoir un algorithme pour éviter l'apparition de ce problème.

- Fonctionnement asynchrone et parallèle ;

- fonctionnement en temps réel ;

- commande programmée selon les algorithmes de commande qui ont été élaborés préalablement pendant la phase de conception.

- présence de pannes des machines et du robot, notion très importante pour la bonne conduite de l'atelier.

- existence de pièces défectueuses.

En ce qui concerne le transport et la manutention des pièces, nous n'avons pas spécifié le nombre exact de robot. En effet, au niveau de la première phase de conception, il existe un grand nombre de problème et parmi ceux-ci on étudiera plus particulièrement le choix du nombre de robots (problème de productivité du système de transport et de l'atelier en général).

Quand le nombre de robots est limité (inférieur au nombre d'opérations de transport, les ressources de transport seront donc considérablement limitées. Cette limitation provoque un problème de file d'attente. Il faudra déterminer le nombre exact de robots et leurs itinéraires optimaux afin de diminuer leurs temps d'inactivité et de réduire le temps de parcours.

On a prévu une phase de débranchement dans le cycle de fonctionnement du robot lorsqu'il n'est pas programmé pour l'exécution d'une tâche. Si le robot n'est pas sollicité à la suite d'une fin d'exécution, il reste dans une position "attente" (robot débranché) en attendant une commande de l'organe de décision. Cette attente peut varier d'une valeur "0" jusqu'à une valeur maximale ( $t_3 - t_2$ ). Une opération de lancement (ou branchement) est exécutée une fois l'ordre de commande émis par l'organe de décision. Le cycle de fonctionnement du robot est présenté sur la fig. 1.3.

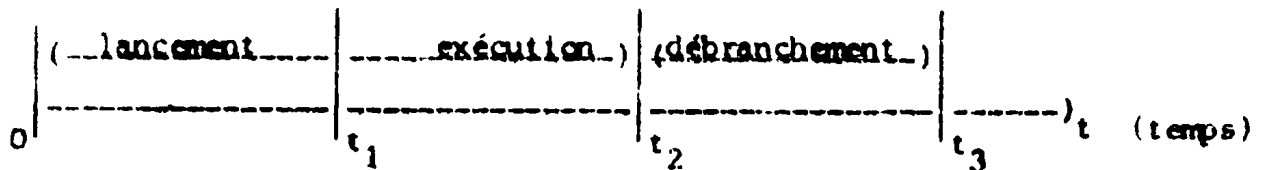


Fig. 1.3. - Cycle de fonctionnement du robot.

#### 1.4. - TACHES DE L'ETUDE DU MODULE :

La structure d'implantation (partie technologique et partie commande) qui a fait l'objet d'une étude préalable a été retenue comme base de travail. A partir de cette configuration ainsi fixée, l'objectif consiste à étudier la conduite du module de production. Pour conduire ce processus on a besoin de s'appuyer sur des méthodes et critères qui facilitent une progression correcte de la conception en disposant d'un ensemble d'outils compatibles qui permettent de modéliser le système à différents niveaux de détail et simplifient les vérifications et évaluations qui s'imposent à chacun de ces niveaux. Ces vérifications et évaluations sont :

1. - vérification du logiciel d'un système de commande en temps réel ;
2. - estimation des performances d'un module ;
3. - Etude de l'influence des modifications de la structure et des paramètres du module sur les performances.

##### 1.4.1. - VERIFICATION DU LOGICIEL :

Vu la complexité de l'objet d'étudier le logiciel de conduite est divisé en plusieurs logiciels. Chaque logiciel, modélisant le fonctionnement d'un ensemble d'équipement, est élaboré séparément. Le logiciel de la conduite de l'atelier est obtenu par la liaison (synchronisation, coordination) de tous les logiciels locaux. Des erreurs de conception peuvent être commises au niveau de cette étape. L'implémentation ne pourra s'effectuer tant que les spécifications fonctionnelles n'ont pas été validées, c'est à dire que le comportement du système ayant été précisé de manière claire et ne prêtant pas à discussion, il doit être conforme au souhait de l'utilisateur.

En effet, le coût des tests de conformité et des modifications effectuées à ce moment pour corriger les erreurs de conception devient vite exorbitant.

Les avantages de l'introduction de cette étape, dite de validation des spécifications fonctionnelles, sont donc les suivants :

- Les erreurs de conception sont découvertes le plus tôt possible et le surcoût qu'elles entraînent est fortement diminué.
- Les tests de bon fonctionnement se réduisent à la vérification de la conformité de la réalisation vis à vis de la spécification.

- la validation par simulation ;
- la validation par expérimentation ;
- la validation en temps réel.

La validation par analyse offre beaucoup d'avantage par rapport aux autres méthodes par sa facilité d'utilisation. En effet, le modèle utilisé pour la spécification est suffisamment formel, les erreurs graves se traduisent par le viol de certaines règles et pourront ainsi être détectées.

Dans le cas de systèmes parallèles, une erreur de description au niveau de l'enchaînement des tâches se traduit en général par une possibilité de blocage, soit par une possibilité de réactivation d'une tâche en cours un nombre indéterminé de fois. L'analyse du modèle permet de détecter ces anomalies et de mettre en évidence un grand nombre d'erreurs. Pour un modèle donné, il est en général possible de savoir quels genres d'incohérence sont détectés et donc de préciser les limites de validation.

#### 1.4.2. - ESTIMATION DES PERFORMANCES DU MODULE :

En supposant que l'algorithme de fonctionnement est correct (étude précédente), l'évaluation du comportement dynamique du système en temps réel tient compte des contraintes temporelles, du temps de réponse.

On effectue l'analyse du comportement vis à vis de certains choix algorithmiques ou technologiques.

#### 1.4.3. - ETUDE DE L'INFLUENCE DES MODIFICATIONS :

On évalue les différents paramètres qui touchent plus directement à la sûreté de fonctionnement en temps réel : fiabilité, sécurité, disponibilité, productivité. Le but de cette étude est :

- choix des équipements correspondant à l'exigence de fonctionnement de l'ensemble des composants du module ;
- optimiser la structure en vue de l'augmentation de la production.

- CHAPITRE II -

RESEAUX DE PETRI

L'OUTIL DE MODELISATION



leur caractère graphique qui permet une visualisation facile des systèmes modélisés.

Les réseaux de PETRI classiques sont considérés comme un outil de modélisation et d'analyse de systèmes à évolutions parallèle et discrète dans le temps. Ils sont particulièrement adaptés pour la spécification de manière formelle des problèmes liés à la commande en temps réel des processus et en particulier le problème de la vérification du logiciel de commande. L'analyse de ces réseaux offre la possibilité d'exprimer en termes simples les propriétés du contrôle des systèmes parallèles et de vérifier leur conformité selon les spécifications du cahier des charges. Cependant, la résolution des problèmes d'estimation des performances d'un module technologique robotisé et de l'influence des modifications de sa structure nécessite l'utilisation de modèles plus développés incluant le paramètre "temps". On peut citer quelques unes des extensions des réseaux de Pétri : les réseaux du Pétri avec arcs inhibiteurs et les réseaux de Pétri étiquetés (AGER73), et (AGER 75), les réseaux de Petri à priorités (HACK 75 ) (MOAL 78), les réseaux de Petri avec jetons colorés (ZERV 77) et les réseaux de Petri temporisés.

A l'exception de ces dernières toutes les autres extensions sont insuffisantes pour traiter les problèmes où le temps est pris en compte dans les spécifications par exemple, les durées d'exécution d'opérations, les durées de pannes etc...)

Les deux premiers travaux sur les réseaux de Petri temporisés ont été réalisés en parallèle et indépendamment l'un de l'autre : l'un au MIT par Ramchandani (RAM 74) et l'autre à l'université de Californie par Merlin (MERL 74). Deux modèles distincts ont été proposés pour associer aux réseaux de Petri le paramètre temps.

Le modèle de Ramchandani associait à chaque transition d'un réseau de Petri classique un paramètre dont la sémantique correspondait à la durée de tir de cette transition. De cette façon, au contraire des réseaux de Petri classiques, le tir d'une transition pouvait être non instantané.

Le modèle de MERLIN, de son côté, associait à chaque transition d'un réseau de Petri classique deux paramètres temporels dont la sémantique correspondait respectivement au délai minimum qu'une transition, une fois sensibilisée, doit attendre avant son tir et au délai maximum pendant lequel cette transition peut rester sensibilisée sans être tirée.

Définition 2.2. :

"Un marquage"  $M$  d'un réseau de Petri classique (RPC) est une fonction  $M$  qui associe à chaque place un nombre naturel dit "contenu en jetons" de la place.

$$p \xrightarrow{M} \mathbb{N}$$

Ce marquage sera représenté par la liste des nombre de jetons contenu dans chaque place.

$M_0$  est le marquage initial.  $M_0$  associe à chaque place le nombre de jetons contenus initialement dans cette place.

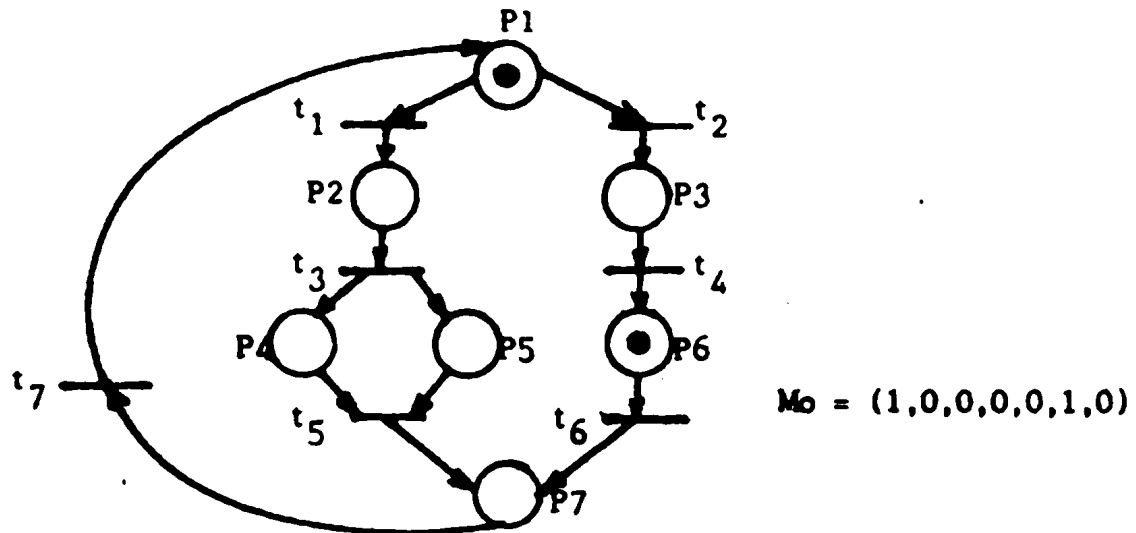


Fig. 2.2.

Définition 2.3 :

Une transition est dite sensibilisée pour un marque  $M$  si toutes ses places précédentes possèdent au moins un jeton

$$\forall p \in P \quad M(p) \geq E(t,p)$$

une transition sensibilisée peut alors être tirée, ce tir entraîne une évolution du marquage du réseau.

Définition 2.4. :

Une transition est "tirable" dans un réseau de Petri classique dans un marquage  $M$ , si elle est sensibilisée par ce marquage.

Le tir d'une transition tirable  $t$  pour un marquage  $M_i$  est constitué de deux opérations indivisibles :

### 11.2.1. - REPRESENTATION MATRICIELLE :

Un réseau de Petri peut être représenté sous forme mathématique par les matrices,  $E(t,p)$  et  $S(t,p)$  et le vecteur de marquage initial  $M_0$ .

Les matrices  $E(t,p)$  et  $S(t,p)$  appelées respectivement matrice d'entrée et matrice de sortie possèdent chacune NT lignes et NP colonnes, NT et NP étant respectivement les dimensions des T et P.

$E(t,p)$  et  $S(t,p)$  sont définies comme suit :

$E(i,j) = n$      o il existe un arc de poids n reliant la place "j" à la transition "i".

$E(i,j) = 0$      il n'y a pas d'arc reliant la place "j" à la transition "i".

$S(i,j) = n$      o il existe un arc de poids n reliant la transition "i" à la place "j".

$S(i,j) = 0$      il n'y a pas d'arc reliant la transition "i" à la place "j".

Exemple :

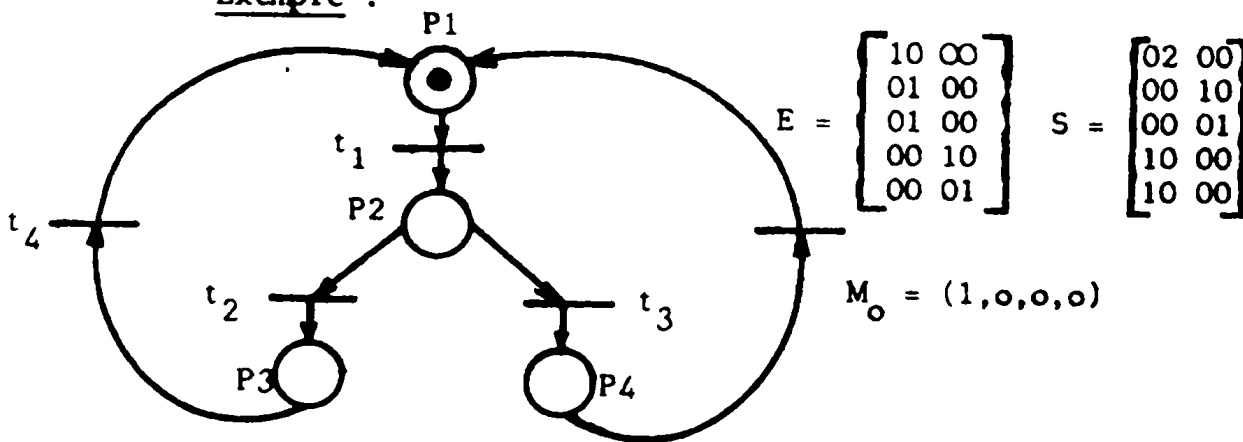


Fig. 2.3

### 11.2.2. - EXEMPLE D'APPLICATION DU RPC :

Afin de donner un aperçu sur l'utilisation des RPC un exemple d'application est proposé : chaîne de remplissage de bidons d'huile (BOS 82).

Un tapis avance pas à pas et transporte des bidons vides qui seront d'abord remplis et ensuite bouchés à des postes de travail différents (voir fig. 2.4). L'approvisionnement en bidons n'est pas régulier et certains bidons peuvent manquer de temps à autre. La distance entre les bidons présents est fixée par des taquets situés sur le tapis et distants d'un pas. Un dispositif permet, à chacun des deux postes décrits, de détecter la présence ou l'absence d'un bidon.

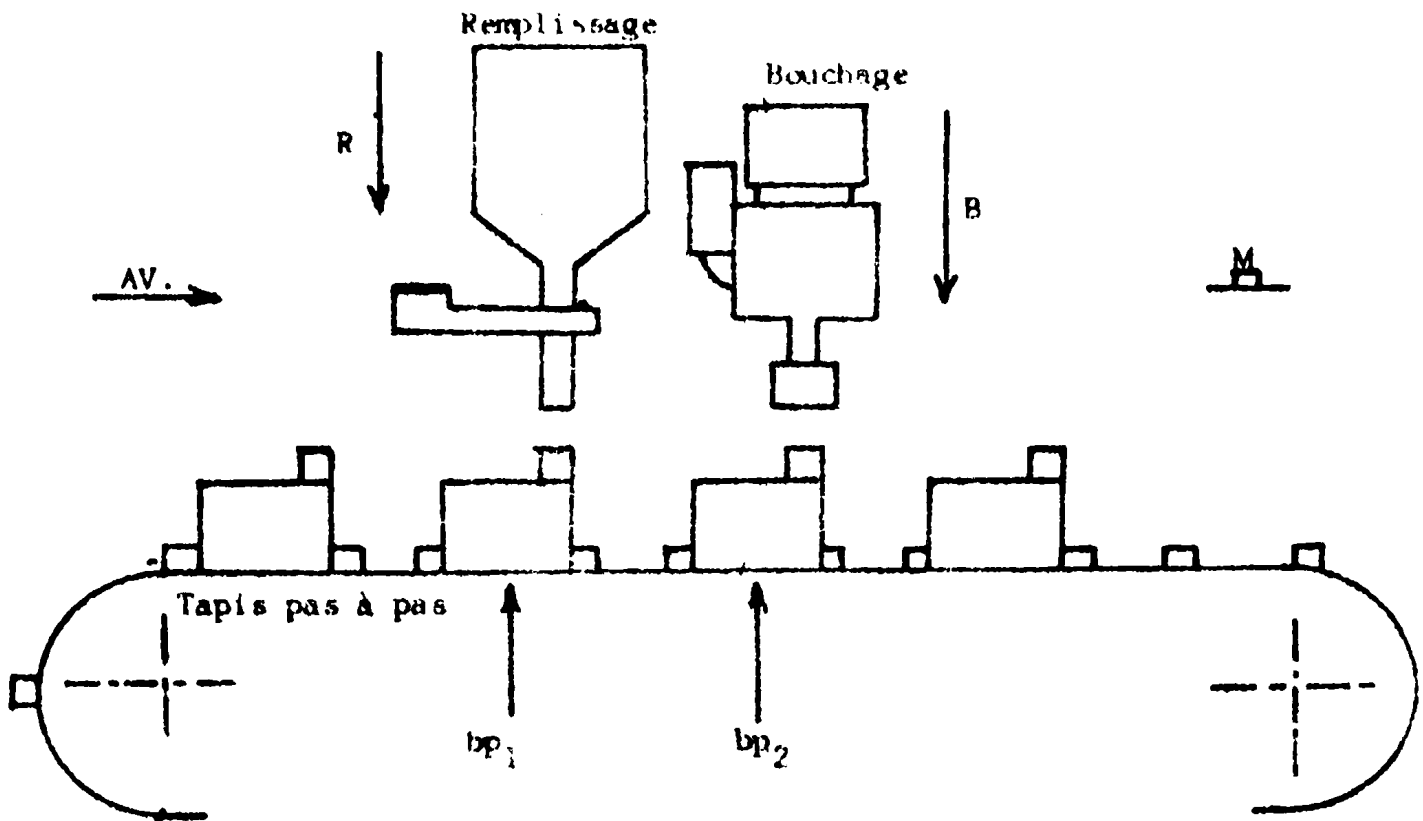


Fig. 2.4 - Chaîne de remplissage de bidons d'huile.

Le réseau de Petri, spécifiant le fonctionnement de ce processus est présenté sur la fig. 2.5, a été obtenu en appliquant la méthode de construction des RPC présenté au chapitre III.

Le modèle obtenu à l'aide des réseaux de Petri, nous permet de mettre en évidence les propriétés essentielles. Les spécifications fonctionnelles et technologiques établies dans le cahier des charges constituent la base pour la modélisation de l'objet à étudier. Si nous considérons l'exemple, le modèle représenté comporte les propriétés suivantes :

1. - Fonctionnement en parallèle des machines outils ;
2. - Les spécifications fonctionnelles et technologiques sont détaillées ;
3. - Il n'est pas difficile de représenter la commande de ce modèle.

En effet, les réseaux de Petri permettent de représenter dans le modèle le protocole des échanges d'informations (commandes et réponses aux commandes).

Cette représentation offre la possibilité d'une part de suivre pas à pas le déroulement du fonctionnement du processus et d'autre part de vérifier si le modèle est conforme aux exigences des spécifications fonctionnelles du cahier des charges.

4. - Le fonctionnement en temps réel de l'objet dans le cas où on attribue un temps aux opérations c'est à dire que les transitions comportent un paramètre "temps" qui représente la durée réelle du déroulement de l'opération.

Il faut souligner que la majorité des RPC existants ont été construits par des approches heuristiques. Des erreurs de conception peuvent être éventuellement commises. L'étape de validation basée sur l'analyse des propriétés des réseaux offre la possibilité d'en réduire considérablement et de vérifier la conformité du modèle à l'objet réel.

Les propriétés des réseaux de Petri classiques seront étudiés dans le paragraphe suivant.

### 11.3 - PROPRIETES DES RESEAUX DE PETRI :

Nous abordons dans ce paragraphe l'étude des propriétés d'un réseau qui permettent d'analyser le fonctionnement d'un système à étudier, en particulier, vérifier le logiciel de commande.

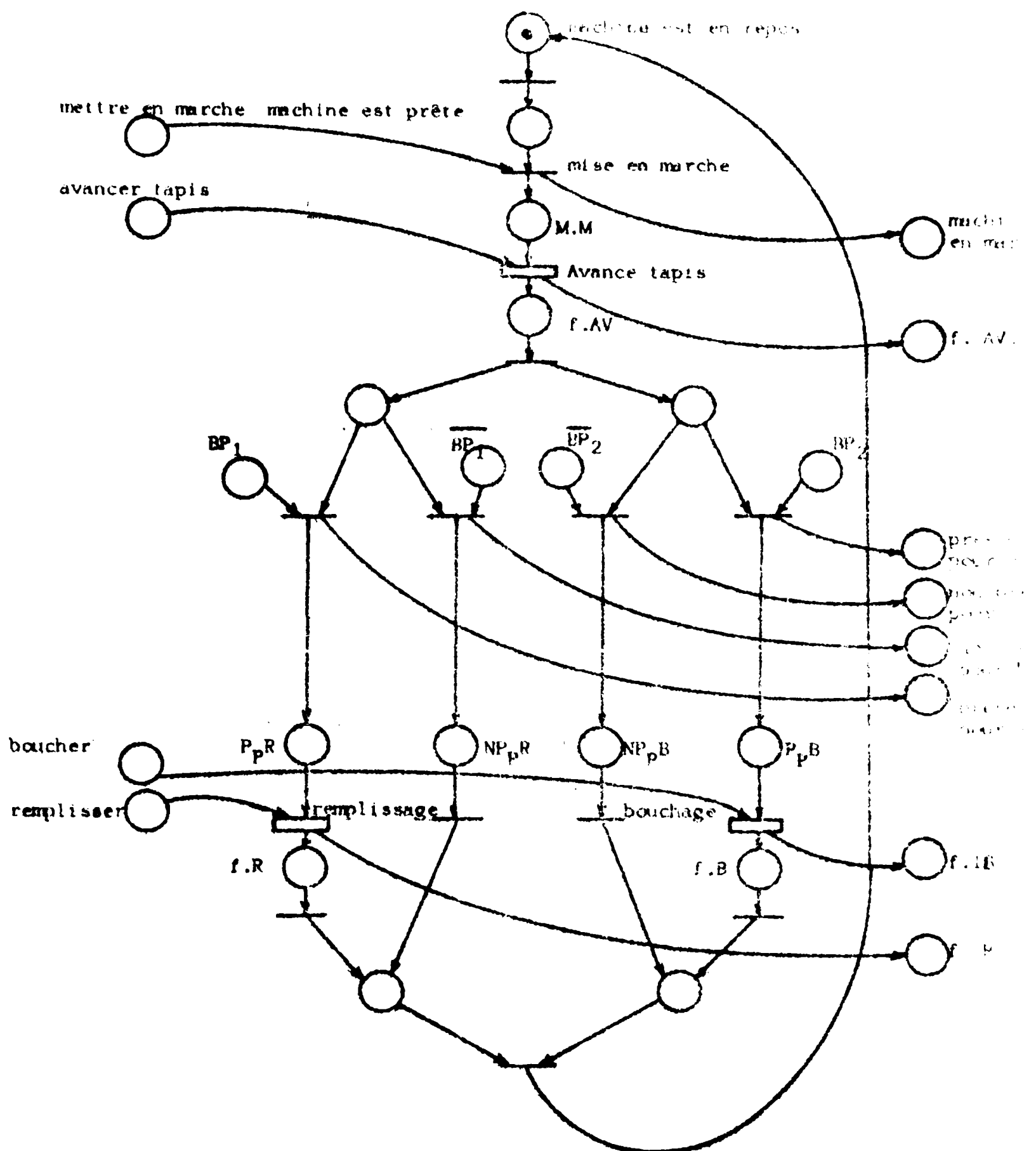


Fig. 2.5 - Réseau de Petri pour la chaîne de remplissage des bidons d'eau

### 11.3.1. - RESEAU BORNE :

#### Définition 2.8. :

Un réseau de Petri est "borné" pour un marquage initial  $M_0$  ssi  $\forall n \in \mathbb{N}$  tel que  $\forall M \in \overline{M_0}^{(n)}$  et  $p \in P$  ;  $M(p) \leq n$

Si  $n = 1$  le réseau est dit "sauf".

#### théorème 2.1. (KARP 69)

Un réseau de Petri RP est borné pour un marquage initial  $M_0$  ssi l'ensemble  $\overline{M_0}^{(n)}$  est de dimension finie.

Ces notions caractérisent la possibilité pour une place d'accumuler une quantité bornée ou non de jetons au cours de l'évolution du réseau.

L'accumulation de jetons dans une place exprime d'une part le fait qu'une erreur de description du modèle est détectée et d'autre part l'ensemble  $M_0$  est infini, son énumération est donc impossible.

### 11.3.2. - RESEAU VIVANT :

#### Définition 2.9 :

Un réseau de Petri est dit "vivant" pour  $M_0$  ssi  $\forall M_1 \in \overline{M_0}^{(n)}$  et  $\forall t \in T$  ;  $\exists$  une séquence de tir comprenant  $t$  et qui est tirable à partir de  $M_1$ .

La notion de réseau vivant est une propriété importante pour interpréter le "bon fonctionnement" de nombreux systèmes. Cette propriété caractérise l'absence de blocage (marquage accessible à partir duquel aucune transition n'est tirable) et assure qu'aucune partie du système de commande n'est inaccessible. Un réseau non vivant signifie une défaillance ou erreur du système de commande.

### 11.3.3. - RESEAU DE PETRI REINITIALISABLE :

#### Définition 2.10 :

Un réseau de Petri est réinitialisable pour un marquage  $M_0$  ssi pour tout marquage  $M_1$  appartenant à l'ensemble  $\overline{M_0}^{(n)}$  il existe une séquence de tir  $S_t$  telle que :

$$M_1 \xrightarrow{S_t} M_0$$

C'est à dire qui ramène au marquage initial à partir de  $M_1$ .

Un réseau de Petri RP réinitialisable traduit le fait que le fonctionnement du système réel est répétitif. Si le réseau ne retourne pas son état initial il en résulte qu'une erreur de conception a été détectée.

#### 11.3.4. - RESEAU DE PETRI BIEN FORME :

##### Définition 2.11 :

Un réseau de Petri est "bien formé" pour  $M_0$  ssi :

- il est borné et vivant pour  $M_0$
- il possède une place "repos" tel que :

- a) cette place a une seule transition suivante appelée "transition initiale" ( $t_{ini}$ ).
- b) Cette place a une et une seule transition précédente appelée "transition finale".  
- Le marquage initial  $M_0$  est le seul marquage de la classe des marquages accessibles  $M_0^{-}$  pour lequel la "place repos" possède un jeton. En plus la seule transition sensibilisée par  $M_0$  est  $t_{ini}$ .

La notion de réseau bien formé permet d'exprimer que la place de repos correspond à un état de repos ou de fin de travail.

Les différentes propriétés décrites dans ce paragraphe sont très intéressantes dans la mesure où elles permettent d'affirmer si le modèle d'un système de commande possède les propriétés de "bon fonctionnement" tel que l'absence de blocage, la finitude des états. La vérification de ces propriétés permet de tester la logique de fonctionnement d'un système de commande.

#### 11.4 - RESEAU DE PETRI TEMPORISE (RPT) :

Les modèles de RPT les plus couramment utilisés tel que :

RPT de MERLIN (MERL 74), RPT de RAMCHANDANI (RAM 74) et RPT de SIFAKIS (SIFA 77), ont <sup>été</sup> développés pour associer explicitement aux réseaux de Petri classique le paramètre "temps".

Dans le modèle de MERLIN le temps est associé à chaque transition du RPC par deux paramètres temporels  $t_{min}$  et  $t_{max}$ , appelés respectivement date de tir ou plus tôt / date de tir au plus tard. Une transition doit rester sensibilisée pendant le délai minimum  $t_{min}$  avant d'être pouvoir tirée et ne peut être sensibilisée au delà du délai maximum  $t_{max}$  sans être tirée. Le tir d'une transition est de durée réelle, hypothèse essentielle pour le fonctionnement du réseau.

Le modèle de RAMCHANDANI associe à chaque transition du RPC un seul paramètre temporel, sa durée de tir. Dès qu'une transition est sensibilisée son tir commence en absorbant les jetons correspondants dans les places d'entrée. Quand la durée de tir est écoulée, les jetons absorbés sont restitués dans les places de sortie.



Le modèle de SIFAKIS associe des durées de séjour aux places du réseau. Ce modèle a été montré qu'il était strictement équivalent à celui de RAMCHANDANI mais il a l'avantage de préserver la sémantique classique des transitions dans un réseau de Petri classique, c'est à dire le tir instantané. Le fonctionnement stipule que lorsqu'un jeton arrive dans une place, il devient indisponible pendant la durée associée, puis devient disponible. Seuls les jetons disponibles sont considérés pour tester si une transition est tirable.

MENASHE (MEN 82) a démontré que les modèles de RAMCHANDANI et de SIFAKIS sont des cas particuliers du modèle de MERLIN. En plus le modèle MERLIN correspond bien à l'objectif de la modélisation du fonctionnement des systèmes asynchrones soumis à des contraintes temporelles. On connaît souvent les bornes inférieures et supérieures pour le franchissement d'une transition (temps de réponse, temps d'exécution d'une opération, etc...). Selon ces considérations le modèle de MERLIN a été choisi par nous en guise de modèle de base à étudier.

#### 11.4.1. - RESEAUX DE PETRI TEMPORISE DE MERLIN (MEN 82) :

##### Définition 2.12 :

Un réseau de Petri temporisé (RPT) est un triplet  $RPT = (R, I, D)$

\* R est un réseau de Petri classique  $R = (P, T, E, S)$

\* I est un ensemble d'intervalles fermés  $(D_{min}, P_{max})$ .

L'ensemble I définit l'intervalle des dates de tirs autorisés pour les transitions. Le domaine de définition de I est l'ensemble des nombres rationnels positifs.

\* D est une fonction "délais"  $T \xrightarrow{D} I$

Soit  $n_p$  et  $n_t$  respectivement le nombre de places et le nombre de transitions du réseau RPT.

$TS(M) = \{t_{S1}, t_{S2}, \dots, t_{SK}\}$  ou  $S_i \in \{1, 2, \dots, n_t\}$ , est l'ensemble des K transitions sensibilisées par un marquage M.

$G(M) = \{S_i / t_{S_i} \in TS(M)\}$ , est l'ensemble des indices des K transitions sensibilisées.

##### Définition 2.13 :

"L'espace de tir de M" est l'espace de dimension des K

$$D(M) = \{x \in \mathbb{R}^K / \forall S_j \in G(M) ; x(j) \leq D \max(t_{S_j})\}$$

##### Définition 2.14 :

Un état dans un RPT est un couple  $Q = (M, X)$  où :

M est un marquage de R.

X est un ensemble de vecteurs contenu dans  $Q(M)$ .

L'ensemble X peut être défini par un système d'inéquation de la façon suivante :

$$X \subseteq Q(M) \left\{ X \in O^K / A X^T \leq B \right\}$$

A est une matrice de K colonnes.

Il est montré dans (MEN 82) que le système d'inéquations  $A X^T \leq B$  définissant l'ensemble X présente trois types d'inéquation.

a)  $x_i \geq \alpha_i(Q)$

b)  $x_i < \beta_i(Q)$

c)  $x_i - x_j < \gamma_{ij}(Q)$

$\alpha(Q), \beta(Q)$  : vecteurs de dimension K

$\gamma(Q)$  : matrice de dimension (K x K)

Deux états  $Q1 = (M1, X1)$  et  $Q2 = (M2, X2)$  sont égaux ssi :

a.  $M1 = M2$

b.  $X1 = X2$

La comparaison de l'égalité de deux espaces de tir est une opération assujétissante. Une solution consiste à réécrire les domaines de tir sous forme canonique qui simplifie la procédure de comparaison.

Il a été démontré (MEN 82) que le système d'inéquation linéaires peut être représenté sous la forme suivante :

$$\alpha_i^* = \min \{x_i / \forall x \in X\}$$

$$\beta_i^* = \max \{x_i / \forall x \in X\}$$

$$\gamma_{ij}^* = \max \{x_i - x_j / \forall x \in X\}$$

Cette forme est appelée "forme canonique"

Une algorithmie pour l'obtention de la forme canonique d'un espace de tir X a été élaboré par (MEN 82), il est présenté au chapitre V.

L'égalité de deux états pourra s'effectuer en considérant donc les vecteurs  $\alpha^*$ ,  $\beta^*$  et la matrice  $\gamma^*$ .

Deux états  $Q1 = (M1, X1)$  et  $Q2 = (M2, X2)$  sont égaux si

- a.  $M1 = M2$
- b.  $\alpha^*(Q1) = \alpha^*(Q2)$
- $\beta^*(Q1) = \beta^*(Q2)$
- $\gamma^*(Q1) = \gamma^*(Q2)$

Définition 2.15 :

Une transition  $t_i$  est tirable dans un réseau RPT et dans un état  $Q = (M, X)$  ssi :

- 1.  $t_i$  est sensibilisée par M
- 2.  $\exists x \in X / x_i \leq n_j \quad j \neq i \in G(M)$

Théorème 2.2. :

Une transition  $t_i$  sensibilisée est tirable ssi

$$\forall j \neq i \in G(M) \quad \gamma_{j,i}^* \geq 0$$

Le temps au plus tôt pour qu'une transition tirable puisse être tirée à partir d'un état  $Q = (M, X)$  est donné par :  $\alpha_i^*(Q)$

Le temps au plus tard appelé limite supérieure effective "LSE" est

$$LSE(Q) = \min \left\{ p_i / \forall j \in G(M) \right\}$$

LSE(Q) est indépendante de la transition

LSE(Q) dépend de l'état Q

Supposons que la transition  $t_i$  soit tirable dans un état  $Q1$  où  $X(Q1)$  est exprimé par les vecteurs  $\alpha(Q1)$ ,  $\beta(Q1)$  et la matrice  $\gamma(Q1)$  ou plus particulièrement  $\alpha^*(Q1)$ ,  $\beta(Q1)$ ,  $\gamma^*(Q1)$ .

Le tir de  $t_i$  est action instantanée qui se passe dans l'intervalle  $[\alpha_i^*(Q1), LSE(Q1)]$ .

Nous verrons dans le chapitre V les règles de calcul de l'état suivant et le concept de classe d'état, notion très importante lors de l'analyse du RPT.

#### 11.4.2. - PROPRIETES D'UN RPT :

##### Définition 2.16 :

Un réseau de Petri temporisé  $R_T$  avec un état initial  $Q_0$  est dit "bloquant" dans un état  $Q = (M, X)$ , ssi  $Q$  est un état accessible de  $R_T$  à partir de  $Q_0$  et si aucune transition n'est sensibilisée par  $M$ . Autrement dit :  $TS(M) = \emptyset$  ce qui implique  $X = \emptyset$ .

##### Définition 2.17 :

Un réseau de Petri temporisé  $R_T$  est dit "vivant" pour un état initial  $Q_0$  ssi quelque soit l'état accessible  $Q_1$  à partir de  $Q_0$  et quelque soit  $t \in T$ , il existe une séquence tirable de transition,  $S_t$ , à partir de  $Q_1$  tel que :

$$Q_1 \xrightarrow{S_t} Q_2 = (M_2, X_2)$$

$T$  est tirable en  $Q_2$ .

##### Définition 2.18 :

Un réseau de Petri temporisé  $R_T$  est dit "cyclique" ou réinitialisable à partir d'un état initial  $Q_0$ , si quelque soit l'état  $Q_1$  accessible à partir de  $Q_0$ , il existe une séquence tirable de transition  $S_t$  à partir de  $Q_1$  tel que :

$$Q_1 \xrightarrow{S_t} Q_0$$

Les propriétés d'accessibilité et borné ne sont pas décidables pour les réseaux RPT. Il existe néanmoins, des conditions suffisantes mais non nécessaire pour qu'un RPT soit borné. Ces conditions permettent de faire la distinction entre deux classes de réseaux :

a) Réseaux dont la propriété "borné" peut être décidée. Ces réseaux donnent les moyens d'exécuter une analyse par énumération d'états.

b) Réseaux pour lesquels la propriété borné est indécidable.

Deux propriétés démontrées par (Gloss 77) peuvent s'appliquer au RPT :

1/ Pour qu'un réseau de Petri temporisé RPT soit borné, il est suffisant mais non nécessaire que le réseau classique associé soit borné.

2/ Pour qu'un réseau de Petri temporisé RPT soit vivant il n'est ni nécessaire ni suffisant que le réseau classique associé le soit également.

## CONCLUSION :

1. - Les réseaux RPC représentent un outil formel, bien orienté pour la description exacte des processus qui possèdent un fonctionnement en temps réel, en parallèle et asynchrone, etc...) L'analyse des propriétés du RPC comme borné, vivant, réinitialisable offre la possibilité de déceler les erreurs dans le logiciel tel que : le blocage, non borné, etc... Ce modèle est bien adapté pour la modélisation du module technologique à étudier en particulier son logiciel de conduite.

2. - Les réseaux RPT représentent un modèle qui permet d'analyser les processus parallèles, asynchrones, etc..., se déroulant en fonction du temps. L'introduction du paramètre "temps" dans le réseau de Petri offre la possibilité d'analyser le comportement dynamique du module à étudier.

Une version du RPT, modèle de MERLIN; possédant certains avantages; a été choisi par nous en tant qu'outils de modélisation du module technologique à étudier.

**- CHAPITRE III -**

---

**METHODE DE CONSTRUCTION DU RESEAU DE PETRI**  
**D'UN MODULE TECHNOLOGIQUE ROBOTISE**

### III.1. - INTRODUCTION -

Dans le chapitre précédent, on a établi la nécessité de l'utilisation des différents réseaux de Petri (classiques et temporisés) en guise de modèle formel d'un module technologique robotisé, fonctionnant en temps réel. Mais la question; "comment construire ce modèle" à partir de certaines données de conception du module"; reste ouverte.

Dans la plupart des ouvrages étudiant la modélisation des processus technologiques par les réseaux de Petri, le problème de la conception des modèles n'est pas traité d'une façon formelle. Généralement ces modèles sont élaborés par des méthodes heuristiques, comme résultats plusieurs erreurs de conception du modèle peuvent être commises (omission des états et des liaisons existantes, pertes de certaines conditions logiques, apparition de section fausse du réseau de Petri, etc...) Souvent la structure du modèle s'avère non optimale à cause de la présence des excédents de sommets (redondance). Les ensembles des entrées et des sorties du modèle sont mal organisés (ou présentés) ce qui engendre une difficulté de connexion avec les autres modèles (par exemple avec le modèle de l'ordinateur).

Nous proposons dans ce chapitre une méthodologie de passage de l'état informel à l'état formel, en utilisant certaines procédures de passage qui nous facilitent la conception du modèle d'un processus industriel à partir des spécifications fonctionnelles établies dans le cahier des charges. Cette formalisation offre la possibilité de diminuer les erreurs de conception du réseau d'ou un gain de temps lors de l'élaboration des modèles. Il existe une possibilité d'automatiser cette phase de conception de RP sur la base de la procédure proposée.

### III.2. - PROCEDURE FORMALISEE PROPOSEE :

#### III.2.1. DONNEES INITIALES :

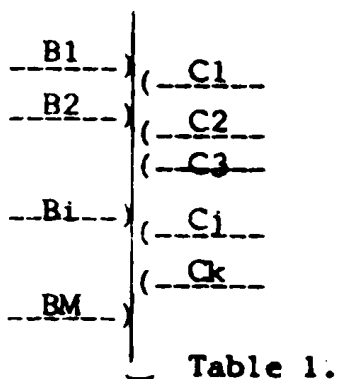
Pour construire le modèle par les réseaux de Petri, on suppose tout d'abord que les spécifications fonctionnelles sont connues (la phase de conception du module a été terminée). La construction du modèle est basée sur le principe de la ressemblance de la structure naturelle de l'objet à étudier et celle du modèle.

On sélectionne d'abord les éléments de base de la modélisation (E.B.M.). On entend par E.B.M. une unité de traitement, de stockage, de transport, de contrôle, etc...)

La structure interne d'un E.B.M. donné n'est pas l'objet de notre étude. On ne considère que les propriétés d'un E.B.M. qui déterminent les interactions avec les autres E.B.M. et exerce<sup>nt</sup> une influence sur le comportement général de l'objet. On établit ces propriétés selon les données technologiques et fonctionnelles du module à étudier en supposant que la partie commande du module a été déterminée au niveau des échanges des signaux entre les deux parties (partie technologique, partie commande).

La construction du modèle par les RP est basée sur les données fonctionnelles. On suppose qu'à chaque fois, on dispose de deux documents :

- Protocole d'échange des informations (fig. 3.1.)
- Table des états fixes pour chaque E.B.M. (fig. 3.2.).



$B_i$  : Signal de commande du système de commande à un E.B.M.

$C_j$  : Signal de l'état d'un E.B.M., émis d'un E.B.M. au système de commande

Fig. 3.1. : Protocole d'échange des informations (exemple)

( $C_j$  est la réaction d'un E.B.M. au signal de commande correspondant).

| états | Signaux de commande |       |                |       |    |
|-------|---------------------|-------|----------------|-------|----|
|       | B1                  | ..... | $B_i$          | ..... | BM |
| $A_n$ |                     |       |                |       |    |
| -     |                     |       |                |       |    |
| $A_s$ |                     |       | $A_i$<br>$C_p$ |       |    |
| -     |                     |       |                |       |    |
| AN    |                     |       |                |       |    |

$A_1 \dots A_N$  : liste limite des états possibles d'un EBM

$B_1 \dots B_M$  : liste limite des signaux de commande.

$A_i$  : état nouveau après entrée du signal  $B_i$  suivant l'état  $A_s$

$C_p$  : Signal attendu d'un E.B.M. après entrée de  $B_i$  en  $A_s$

Fig. 3.2. - table 2 des états fixes d'un E.B.M.



Les informations contenues dans le protocole d'échange sont classées en ordre croissant dans le temps suivant un axe dirigé du haut vers le bas.

La composition des tables des états est déterminée à partir de la documentation des spécifications fonctionnelles. Un état possible sélectionné doit être évidemment observé, mesuré et testé par le système de commande.

### III.2.2. - ETAPES DE LA CONSTRUCTION DU RESEAU DE PETRI DE LA PARTIE TECHNOLOGIQUE DU MODULE :

Le module à étudier est composé de deux parties interconnectées : (fig. 3.3.).

- partie commande qui comprend l'ordinateur ;
- partie technologique qui englobe l'ensemble des équipements technologiques.

La partie commande a pour rôle de gérer les activités des opérateurs (équipements) de façon à réaliser un fonctionnement donné. Elle reçoit en entrée les informations issues de la partie technologique et agit en fonction de ces entrées en émettant des commandes.

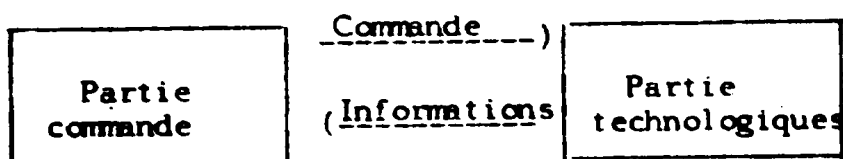


Fig. 3.3.

Ces interactions entre les deux parties sont décrites par les protocoles d'échanges des informations.

On propose une procédure de la construction du RP de la partie technologique, basée sur l'exécution successive des étapes suivantes :

#### Etape 1. :

On sélectionne les processus technologiques du module à étudier et on détermine les interactions entre eux selon l'itinéraire de déplacement des pièces. Cette sélection est déterminée par un graphe orienté appelé  $H_0$  dont les sommets représentent les processus technologiques, les arcs sont les liens matériels entre eux.

### Etape 2. :

Pour chaque im processus technologique on construit un graphe  $H_i$ , dont les sommets, (la quantité de ceux-ci est égale à  $N_i$ ), sont les opérations sélectionnées, les arcs sont les liens matériels entre eux. Dans ce cas il s'agit des opérations de traitement, de stockage, de mesure, de contrôle, de transport.

### Etape 3. :

Pour chaque opération, on détermine ses phases typiques :

- I. - activation
- II. - exécution
- III. - achèvement ou désactivation.

### Etape 4 :

Pour chaque kème de la phase ( $K = I, II, III$ ) on construit un réseau de Petri des données initiales. Dans cette étape on tient compte de la liste limite des états fixes de la phase considéré. Le passage d'un état à un autre est conditionné par le processus principaux et supplémentaires. Les processus principaux est le régime de fonctionnement normale des équipements. On désigne par l'ensemble des conditions spéciales correspondant au début d'un processus principal les états suivants :

- existence d'un signal de commande  $B_i$  fixe
- existence d'un objet matériel (pièce) à l'entrée d'une phase
- état des machines, disponibilité de l'équipement

Après exécution du processus principal on a un état nouveau de l'opération :

- une pièce à la sortie de la phase ; signal d'information,  $C_p$ .

Le processus supplémentaire est caractérisé par l'absence du flot matériel sur son entrée ou sur sa sortie. Dans ce cas, on peut envisager l'absence des signaux informatiques  $B_i$  ou  $C_p$ . Ces processus décrivent les anomalies de fonctionnement, par exemple :

- pièce défectueuse, panne de machine, etc...

La modélisation des processus supplémentaires est représentée par des blocs spéciaux RP. Dans le cas où il y a nécessité de les utiliser, on les inclut dans le modèle des processus principaux (voir étape 4.9).

Suivant ces remarques, on construit le RP de la même phase dans l'ordre suivant :

4.1. - On énumère tous les états possibles  $A_1 \dots A_n$  de la phase considérée selon le tableau 2 de la fig. 3.2. A chaque état correspond un élément du réseau à construire qui est une place représentée par un cercle. Ces places ou états sélectionnés sont disposés selon la verticale.

4.2. - On énumère tous les signaux de commande  $B_1 \dots B_M$  selon le tableau 2 de la fig. 3.2. de la phase considérée ; à chaque signal correspond une place. Cette place - signal de commande est placée à gauche de la suite des places formées suivant l'état précédent.

4.3. - On énumère tous les signaux de l'état  $C_1 \dots C_k$  représentés dans la fig. 3.1. A chaque signal correspond une place. Ces places - communication sont placées selon l'ordre de leur apparition possible à droite de la suite des places formées à l'étape 4.1.

4.4. - On hachure les places correspondant au début et à la fin de la phase considérée afin de faciliter leur assemblage avec le réseau commun.

4.5. - Pour la phase d'exécution, on construit deux places "complémentaires" qui correspondent à l'existence d'une pièce dans le traitement et d'une pièce déjà traitée. Ces places-pièces sont placées respectivement au début et à la fin du réseau de phase considérée.

4.6. - Suivant la spécification des places-états des tableau 1 et 2, on énumère les processus principaux de la phase considérée. A chaque état des processus correspond une transition du réseau .

4.7. - les places et les transitions sont liées par des arcs orientés.

4.8. - Selon les données technologiques, on détermine les valeurs temporelles pour chacune des transitions non primitives. Les transitions primitives sont utilisées pour décrire des conditions logiques existantes dans le réseau.

4.9. - Dans le cas d'un traitement spécial (panne, pièce défectueuse, etc...), on ajoute à certaines places du réseau un bloc appelé "bloc refus" pour panne, dans le cas d'une pièce défectueuse ce bloc est appelé "bloc rebut".

Etape 5. :

On construit le réseau de la jème opération en réunissant les réseaux de chacune de ses phases. Lors de cette assemblage, on introduit des places fictives et des transitions primitives qui ne correspondent pas aux processus et aux évènements réels mais qui sont nécessaires, soit pour respecter les règles communes de la construction des réseaux de Petri, soit pour obtenir les informations sur les états intermédiaires.

Etape 6. :

Pour assurer le passage à l'état initiale de la jème opération, on introduit des arcs complémentaires.

Etape 7. :

On réalise l'assemblage du réseau du ième processus technologique en faisant la jonction des réseaux de ses opérations selon la structure du graphie  $H_i$  en utilisant les étapes 5 et 6.

Etape 8. :

De la même manière, on obtient le réseau du module en réunissant les réseaux de ses processus technologiques.

Etape 9. :

Le marquage initial est obtenu par la répartition des jetons aux places correspondantes.

L'organigramme de la procédure proposée est présentée sur la fig. 3.6.

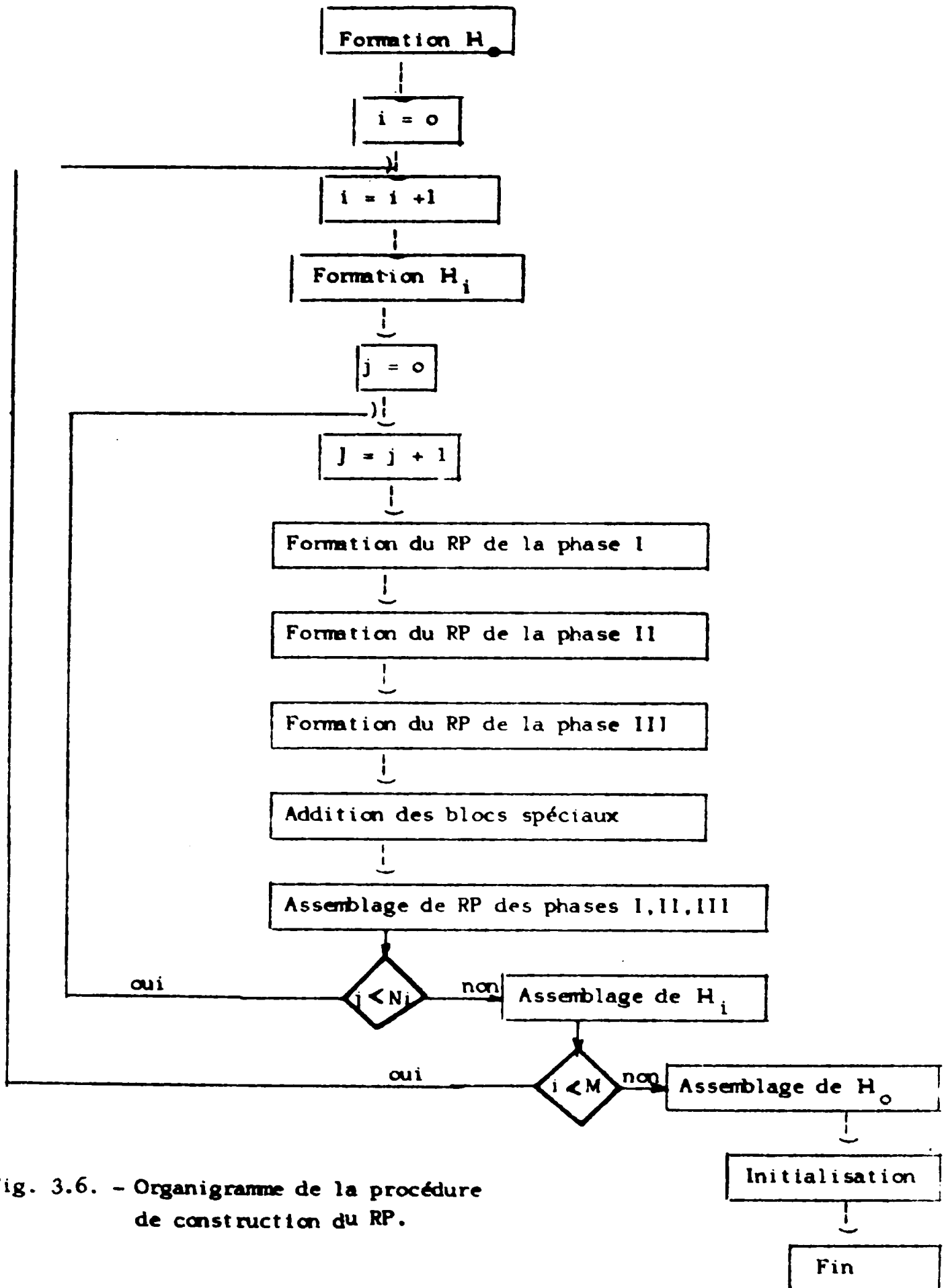


Fig. 3.6. - Organigramme de la procédure de construction du RP.

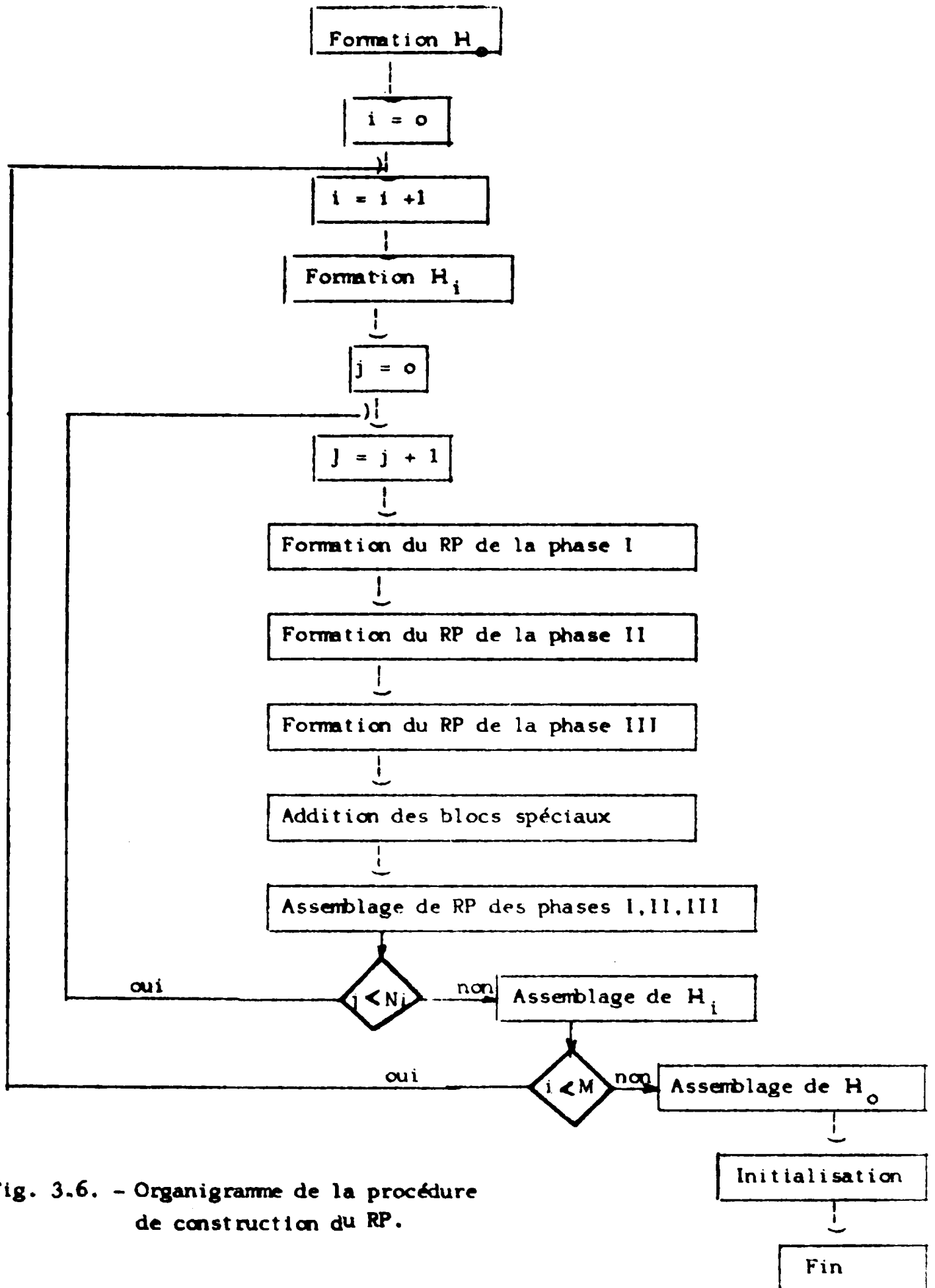


Fig. 3.6. - Organigramme de la procédure de construction du RP.

### III.3 - APPLICATION :

Nous allons dans ce paragraphe donner une application de la méthode de construction du RPC. L'objet à modéliser est le module technologique robotisé qui a été présenté au paragraphe 1.3. Selon la procédure formelle élaborée, la construction du RPC s'effectue par étapes successives.

#### III.3.1. - GRAPHE $H_0$ DU MODULE :

La structure du graphe  $H_0$  représente l'ordre (donné) de passage des pièces sur l'ensemble des machines. On rappelle que d'après les spécifications du paragraphe 1.3 toutes les pièces possèdent le même itinéraire technologique. Les noeuds du graphe  $H_0$  représentent les différents processus technologiques, les arcs constituent les liens matériels entre ces différentes machines. L'itinéraire des pièces selon les spécifications technologiques détermine la structure générale du graphe  $H_0$ , présentée à la fig. 3.7.

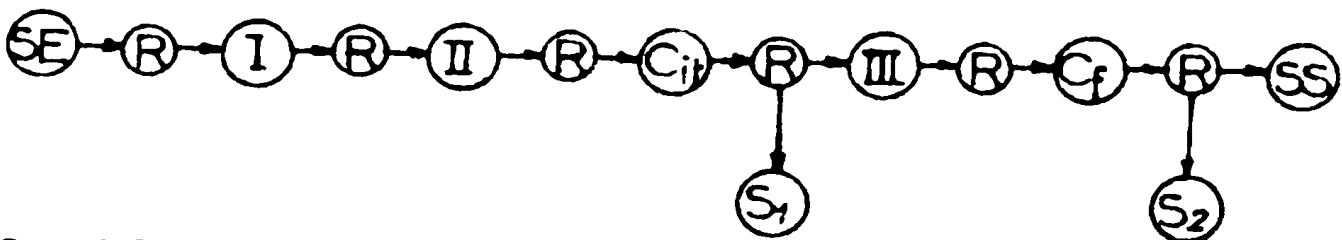


Fig. 3.7. - Graphe  $H_0$  du module à étudier.

SE : Stock d'entrée des pièces

R : Robot transporteur

I, II, III : Processus technologiques

Cit, Cf : Processus de contrôle de la qualité intermédiaire (Cit) et finale (Cf)

S1, S2 : Stocks des pièces défectueuses

SS : Stock de sortie.

Les processus "I" et "III" sont exécutés sur la même machine - outil M1. Le processus "III" est prioritaire.

L'analyse du graphe  $H_0$  montre que la structure se compose de deux parties :

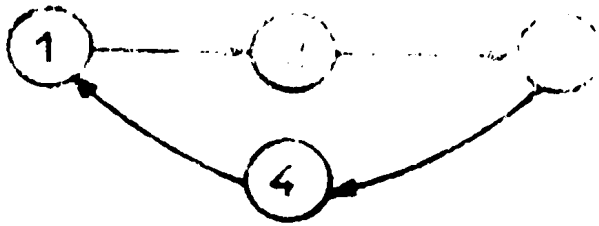


Fig. 3.8 - Graphe H<sub>1</sub> du système de commande.

Remarque : L'opération "4" du graphe H<sub>1</sub> est une opération qui permet, pour des raisons de logique de fonctionnement, le passage à l'état initial.

|                                      |   |                      |
|--------------------------------------|---|----------------------|
| <u>"activer"</u>                     | ( commande n'est pas correct<br>panne du robot )                      | } phase activation   |
| <u>"brancher"</u>                    | ( robot est activé<br>commande n'est pas correct<br>panne du robot )  |                      |
| déplacer le robot dans une coord.    | ( robot est branché<br>commande n'est pas correct<br>panne du robot ) | } phase d'exécution  |
| charger le robot                     | ( déplacement fini<br>commande n'est pas correct<br>panne du robot )  |                      |
| déplacer le robot dans la position M | ( chargement fini<br>commande n'est pas correct<br>panne du robot )   |                      |
| décharger le robot                   | ( déplacement fini<br>commande n'est pas correct<br>panne du robot )  |                      |
| débrancher le robot                  | ( déchargement fini<br>commande n'est pas correct )                   | } phase d'achèvement |
| désactivé                            | ( robot débranché<br>commande n'est pas correct )                     |                      |
|                                      | ( robot est désactivé )   |                      |

Tableau 3.1.



b) Système de traitement : usinage d'une pièce sur n'importe quelle machine-outils. Cette opération se répète aussi plusieurs fois dans le graphe Ho. L'uniformité de fonctionnement des différentes machines permet de considérer que celles-ci possèdent le même caractère d'exécution des opérations technologiques.

Cette décomposition du graphe Ho donne la possibilité de traiter séparément les phases de transport et de traitement.

### III.3.2. - RPC DU SYSTEME DE TRANSPORT :

D'après les spécifications fonctionnelles le robot peut se trouver dans deux régimes de fonctionnement :

- activité : transport d'une pièce
- attente : le robot est débranché et se trouve dans une des positions fixées.

Le passage de l'état d'attente à l'état d'activité s'effectue selon une suite de signaux de commande suivant l'ordre indiqué par le protocole d'échanges des informations du processus de transport dans le tableau 3.1. On sélectionne d'après ce protocole trois phases : activation (1), exécution (2) et achèvement (3). Celles-ci déterminent la base du graphe  $H_1$  du système de transport (Fig. 3.8). Au début de son activité le robot doit être activé à la fin de l'exécution il devient "non activé" par l'intermédiaire d'un ordre émis pendant ou dans la phase "achèvement". La phase d'exécution est composée de cinq opérations principales :

- a - lancement
- b - déplacement
- c - chargement
- d - déchargement
- e - débranchement.

Cette phase s'effectue dans un ordre déterminé d'après l'algorithme de commandes .

### III.3.2.1. OPERATION DE DEPLACEMENT :

Le transport d'une pièce par le robot d'une coordonnée initiale à une coordonnée finale donnée (il s'agit du changement de position du robot) s'effectue selon les signaux émis par le système de commande, les spécifications concernant cette opération sont présentées dans les tableaux 3.2 et 3.3.

Le tableau 3.2. détermine la position finale possible du robot sur un pas à partir de son état initial et selon le signal de commande. Dans chaque état initial fixé, le robot possède au maximum deux possibilités de changement de position sur un pas. Par exemple, à partir de l'état "RB. RS1" il peut se déplacer soit à la position "R M<sub>3</sub>" . soit à la position "R M<sub>4</sub>" (voir tableau 3.2).

Le tableau 3.3. détermine la position finale possible du robot à partir d'un état initial et selon le signal de commande. La commande "déplacer le robot dans une coordonnée N" s'effectue selon une série de micro-commande. Le robot est déplacé par les commandes fixées. Ce déplacement se déroule de "pas à pas", un pas est accompli par une micro-commande. Le nombre de micro-commande est déterminé à chaque fois par le système de commande en analysant les coordonnées initiales et finales. Par exemple le passage de la position RSE à la position RSS se fait selon la série de commande "déplacer le robot" (SE, M1, M2, M3, S1, M4, S2, SS) (voir tableau 3.2. et 3.3.).

| Commande sur<br>Etats du robot<br>un pas | DEPLACER LE ROBOT VERS ..... |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
|--|------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|  | I                            | SE         | M2         | M1         | M3         | M2         | S1         | M3         | M4         | S2         | S2         | M4         | SS         | S2         |
| RB . RSE                                 | RM1<br>RM1                   |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| RB . RM1                                 |                              | RSE<br>RSE | RM2<br>RM2 |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| RB . RM2                                 |                              |            |            | RM1<br>RM1 | RM3<br>RM3 |            |            |            |            |            |            |            |            |            |
| RB . RM3                                 |                              |            |            |            |            | RM2<br>RM2 | RS1<br>RS2 |            |            |            |            |            |            |            |
| RB . RS.1                                |                              |            |            |            |            |            |            | RM3<br>RM3 | RM4<br>RM4 |            |            |            |            |            |
| RB . RM4                                 |                              |            |            |            |            |            |            |            |            | RS1<br>RS1 | RS2<br>RS2 |            |            |            |
| RB . RS2                                 |                              |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            | RM4<br>RM4 | RSS<br>RSS |            |
| RB . RSS                                 |                              |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            |            | RS2<br>RS2 |

Tableau 3.2.

| Commande<br>Etats Robot | Déplacer le robot dans pos.Fin. |            |            |            |            |            |            |            |
|-------------------------|---------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|                         | AE                              | M1         | M2         | M3         | S1         | M4         | S2         | A5         |
| RSE                     | RSE<br>RSE                      |            |            |            |            |            |            |            |
| RM1                     |                                 | RM1<br>RM1 |            |            |            |            |            |            |
| RM2                     |                                 |            | RM2<br>RM2 |            |            |            |            |            |
| RM3                     |                                 |            |            | RM3<br>RM3 |            |            |            |            |
| RS1                     |                                 |            |            |            | RS1<br>RS1 |            |            |            |
| RM4                     |                                 |            |            |            |            | RM4<br>RM4 |            |            |
| RS2                     |                                 |            |            |            |            |            | RS2<br>RS2 |            |
| RSS                     |                                 |            |            |            |            |            |            | RSS<br>RSS |

Abréviations utilisées :

RSE : Robot près SE

RM1 : Robot près M1

RM2 : Robot près M2

RM3 : robot près M3

RS1 : robot près S1

RM4 : robot près M4

RS2 : robot près S2

RSS : robot près SS

RB : robot branché

(tableau 3.3.)

Le réseau de Petri obtenu à partir des tableaux 3.1 - 3.2 - 3.3. est représenté sur la fig. 3.9. Ce réseau est composé de :

- places P24, P25, ... P31 : position du robot (places état)
- place P9 : état du robot avant l'exécution de l'opération
- places P10, ... P23 : signaux de micro-commande ou commande pas à pas
- places P32, ... P39 : signaux d'information de l'état du robot
- places P40, ... P47 : signaux de commande de "fin de déplacement".
- place P5 : signal d'information de fin déplacement
- places P48, ... P55 : position finale du robot (places état)
- transitions  $t_6, \dots, t_9$  : exécution de l'opération de déplacement pas à pas.
- transitions  $t_{20}, \dots, t_{33}$  : transitions de conditions logiques
- transitions  $t_{34}, \dots, t_{41}$  : transitions de conditions logiques

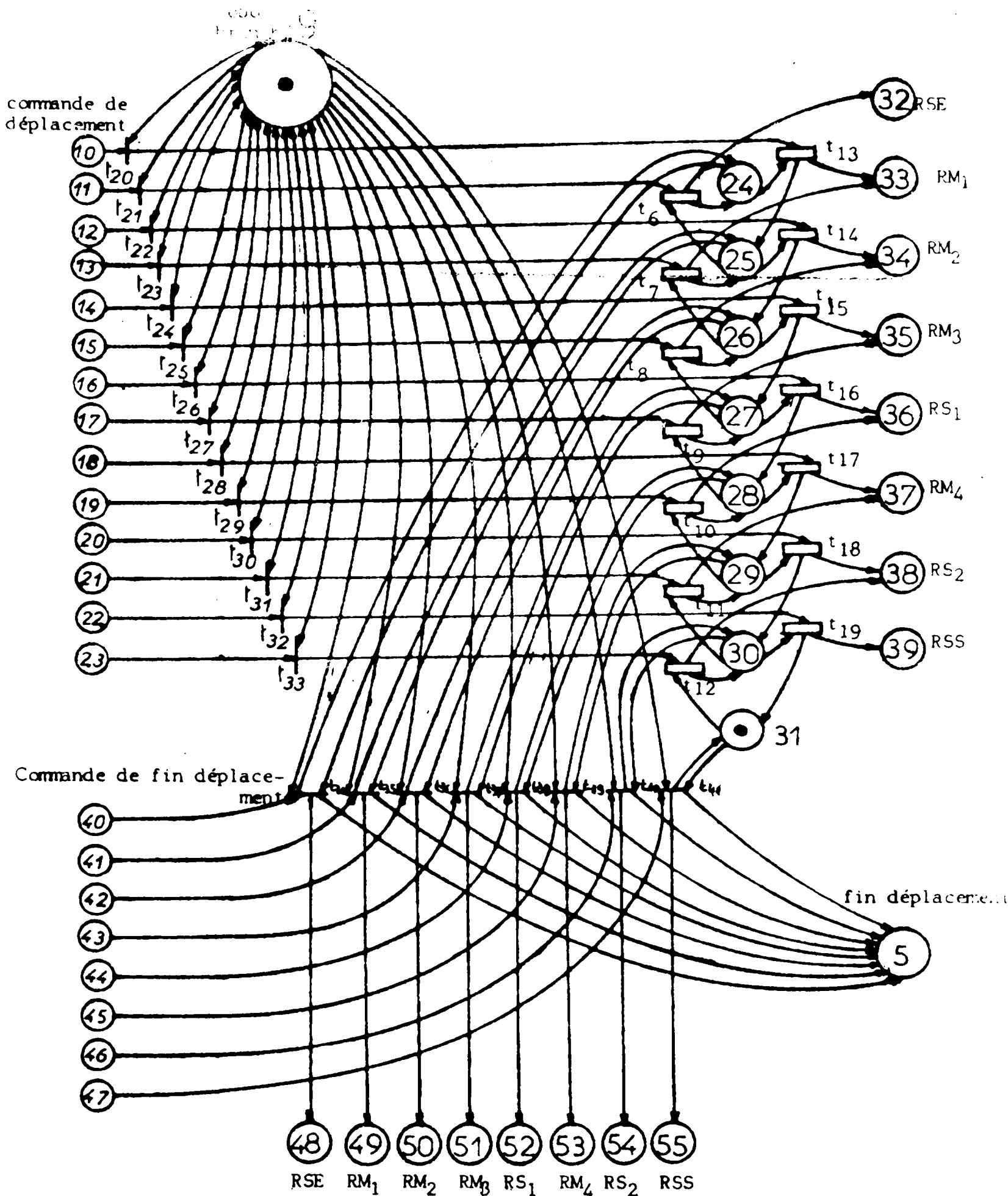


Fig. 3.9 - Réseau RP de l'opération DEPLACEMENT

Deux types de transitions sont représentées dans ce réseau, les transitions qui expriment l'existence des conditions logiques et les transitions qui décrivent l'exécution d'une opération. Dans le cas où la durée d'exécution est pris en considération, une contrainte temporelle exprimant cette durée est représentée sur le réseau sous la forme d'un intervalle. Le réseau RPC à construire, où le paramètre "temps" est absent, est considéré comme la base de la construction du réseau de Petri temporisé (voir paragraphe II.4.).

### III.3.2.2. - OPERATION DE CHARGEMENT :

Cette opération ne s'effectue que dans les positions qui correspondent aux coordonnées fixées de chaque unité de l'équipement du module. Au début de cette opération, le robot doit être libre (robot déchargé), à la fin il passe à l'état occupé (chargé d'une pièce). Le tableau 3.4 présente les états possibles du robot lors de l'opération de chargement.

| Etat \ Commande | charger    | charger     | charger    | charger    | charger     |
|-----------------|------------|-------------|------------|------------|-------------|
| RSE .ESE .RD    | RC<br>SELi | RC<br>SELi  |            |            |             |
| RM1 ,EM1 ,RD    |            | RC<br>Mi Li | RC<br>M1Li |            |             |
| RM2 ,EM2 ,RD    |            |             | RC<br>M2Li | RC<br>M2Li |             |
| RM3 ,EM3 ,RD    |            |             |            | RC<br>M3Li | RC<br>M3Li  |
| RM4 .EM4 .RD    |            |             |            |            | RC<br>M4 Li |

Tableau 3.4

- RC : Robot chargé
- RD : robot déchargé
- EMi : état de la machine Mi
- Mi Li : Mi libre

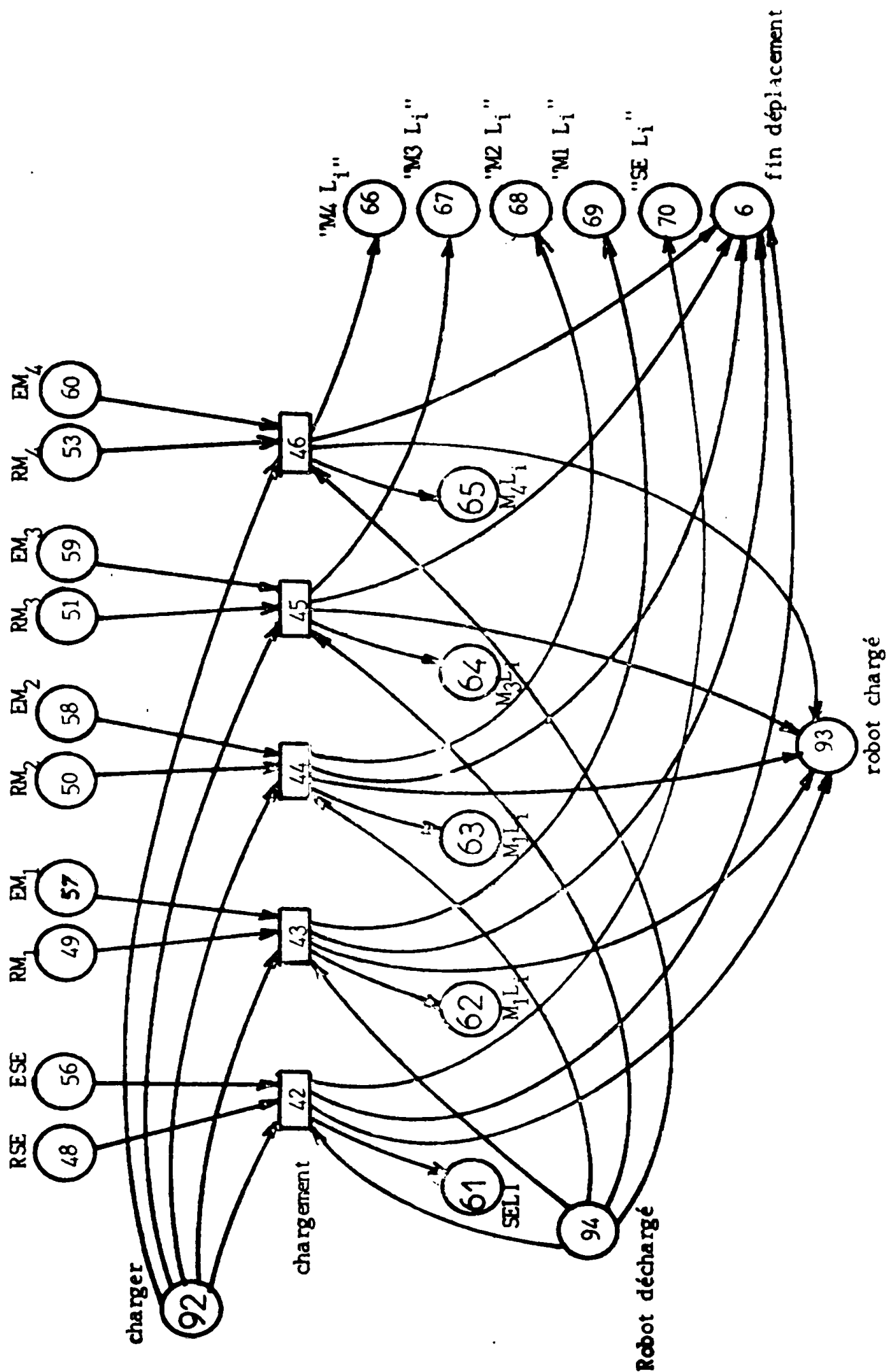


Fig. 3.10 - RPC de l'opération chargement

Le RP de l'opération "chargement" qui a été construit selon les données du tableau 3.4 est présenté sur la fig. 3.10, le réseau est composé de :

- places P48,...P53 : robot près de la machine Mi (places - état)
- places P56,...P60 : états des machines ; pièces prêtes pour l'opération suivantes (places - états).
- places P61,...P65 : état des machines, machines libres (places - état)
- places P66,...P70 : signal information de l'état des machines (places - information).
- place P92 : signal de la commande "chargement"
- place P93 : état final du robot (robot chargé)
- place P94 : état initial du robot (robot déchargé)
- place P6 : signal information de l'état final du robot (robot chargé)
- transitions t42,...t46 : exécution de l'opération chargement

### III.3.2.3. - OPERATION DE DECHARGEMENT :

La construction du RP de l'opération "déchargement" s'effectue de la même <sup>manière</sup> que l'opération chargement mais en se basant cette fois-ci sur le tableau 3.5 des états fixes.

| Commande<br>Etat | décharg   | décharger | déchar.   | Décharg.  | décharg.  | décharg.  | décharg.  |
|------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| RM1.EM1.RC       | RD<br>PM1 | RD<br>PM1 |           |           |           |           |           |
| RM2.EM2.RC       |           | RD<br>PM2 | RD<br>PM2 |           |           |           |           |
| RM3.EM3.RC       |           |           | RD<br>PM3 | RD<br>PM3 |           |           |           |
| RS1.ES1.RC       |           |           |           | RD<br>PS1 | RD<br>PS1 |           |           |
| RM4.EM4.RC       |           |           |           |           | RD<br>PM4 | RD<br>PM4 |           |
| RS2.ES2.RC       |           |           |           |           |           | RD<br>PS2 | RD<br>PS2 |
| RSS.ESS.RC       |           |           |           |           |           |           | RD<br>PSS |

Tableau 3.5.

Le réseau RP de cette opération représenté sur la fig. 3.11 il se compose de :

- places P49, ..., P55 : robot près de la machine  $M_i$
- places P71, ..., P77 : état initial des machines "machines libres"
- places P78, ..., P84 : état final des machines "pièces sur machines"
- places P85, ..., P91 : signal information de l'état final des machines
- places P95 : signal de la commande "décharger"
- places P104 : état initial du robot
- places P96 : état final du robot
- transitions  $t_{47}, \dots, t_{53}$  : exécution de l'opération "déchargement"

III.3.2.4. - RP DE LA PHASE D'ACTIVATION DU ROBOT :

Cette phase a lieu chaque fois qu'un nouveau produit est lancé. Il correspond en pratique à la préparation du robot pour un nouveau travail. Les spécifications nécessaires correspondant à cette phase sont présentées au tableau 3.6.

Tableau 3.6.

|                 |          |                  |
|-----------------|----------|------------------|
|                 | Commande | "Activer"        |
| Etats           |          |                  |
| Robot désactivé |          | Activation<br>RA |

RA : ROBOT EST ACTIVE

Le réseau de la phase activation est présenté sur la fig. 3.12



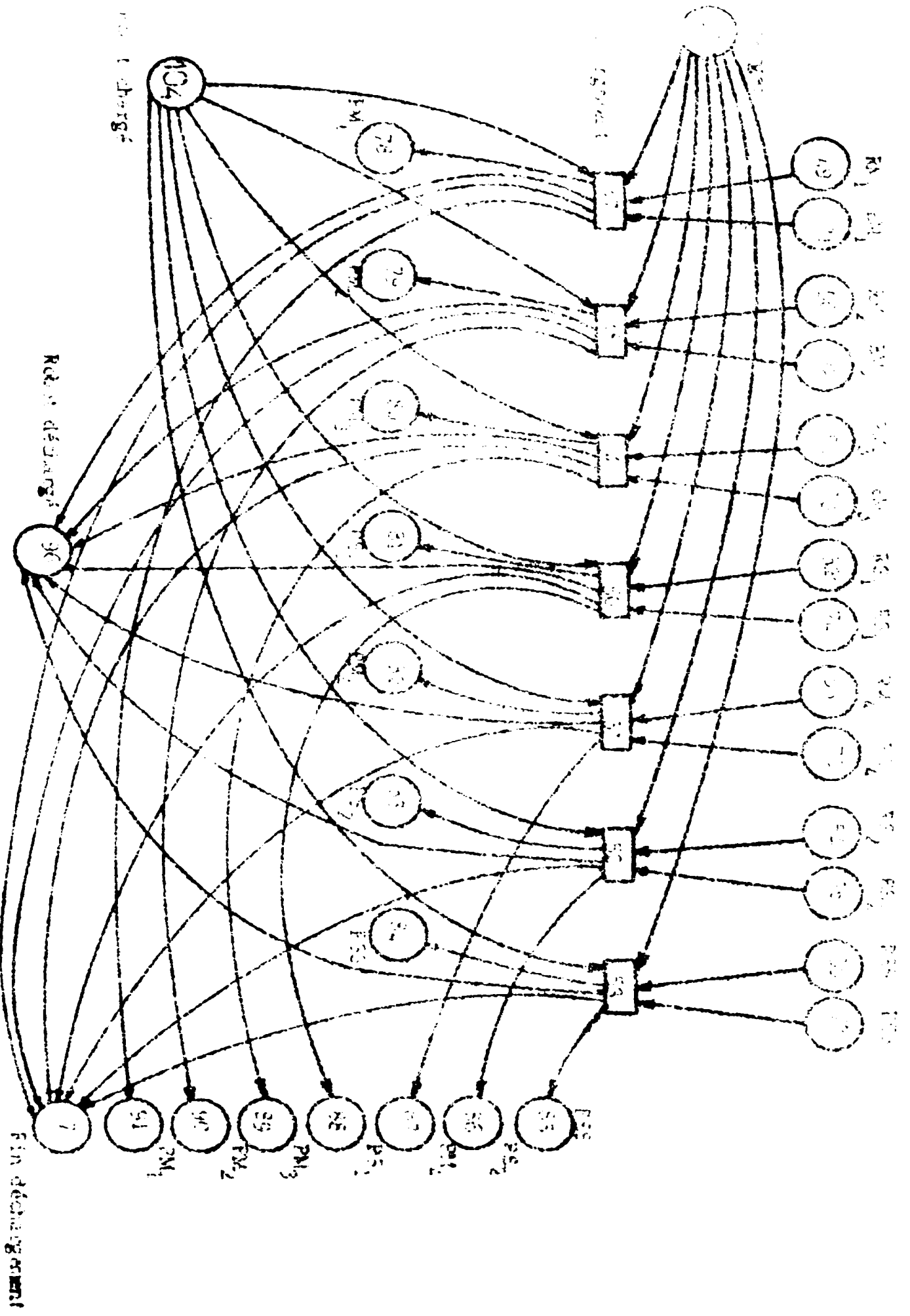


FIG. 2011

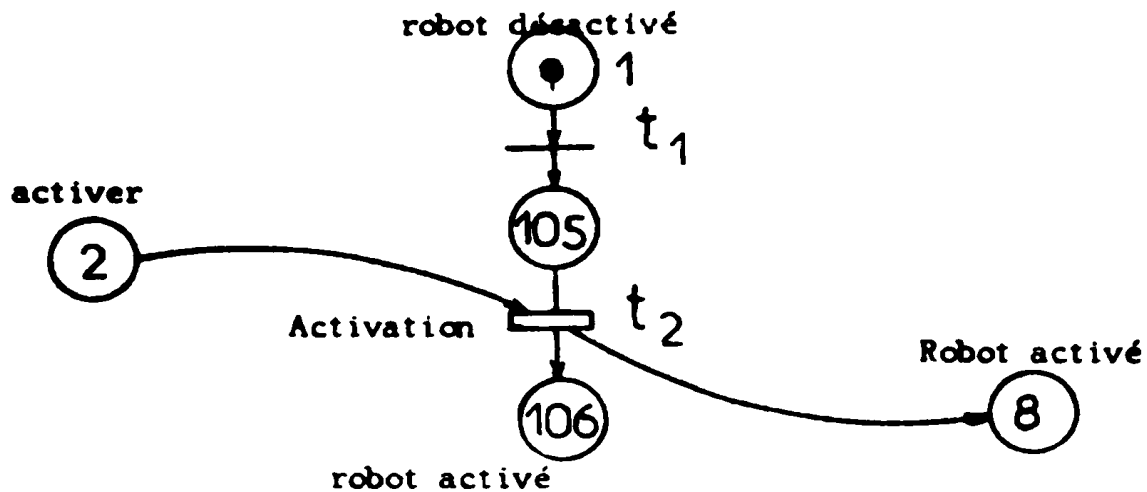


Fig. 3.12 RPC de la phase activation du robot

Ce réseau est composé de :

- place  $P_2$  : signal de la commande "activer"
- place  $R_1$  : état initial du robot "robot désactivé" ou robot au repos
- place  $P_{105}$  : place fictive
- place  $P_8$  : signal information du robot "robot est activé"
- place  $R_{106}$  : état final du robot "robot activé"
- transition  $t_2$  : exécution de l'opération "activation"
- transition  $t_1$  : condition logique.

III.3.2.5. - RP DE LA PHASE ACHEVEMENT :

Cette phase a lieu à la fin d'un travail fixé pour une durée déterminée (passage du robot de l'état débranché à l'état désactivé). Les spécifications de cette phase sont présentées au tableau 3.7.

Tableau 3.7.

|          |                 |
|----------|-----------------|
| Commande | Désactiver      |
| Etat     | Robot désactivé |
| RD.RSS   | Robot désactivé |

Le RP de la phase achèvement est présenté sur la Fig. 3.13.

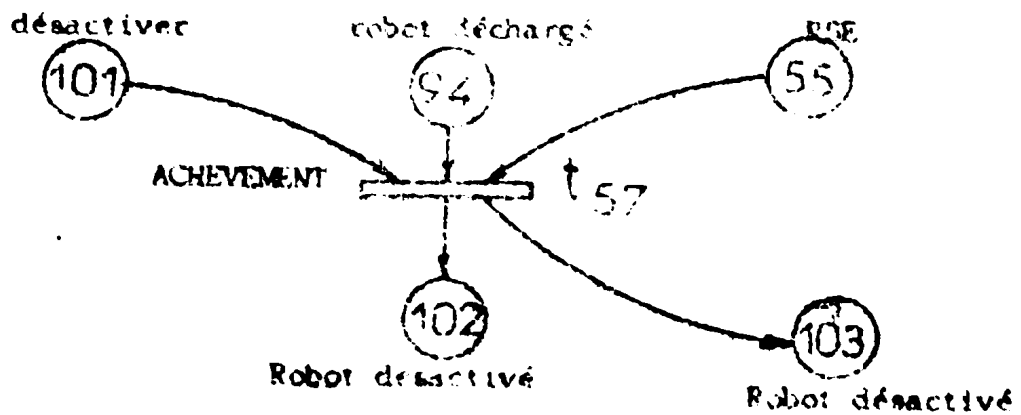


Fig. 3.13 RP de la phase achèvement

Le réseau est composé de :

- place P94 : état initial du robot "robot déchargé"
- place P101 : signal de la commande "désactiver"
- place P102 : état final du robot "robot désactivé"
- place P103 : signal information de l'état final du robot
- transition  $t_{57}$  : exécution de la phase "désactivation"
- Place P55 : état de la position du robot "robot près SE"

III.3.3. : RP DE L'OPERATION TRAITEMENT :

La table des états fixes est identique pour les machines M2, M3, M4 (tableau 3.9), les réseaux RP de ces machines seront semblables (on ne représente qu'un seul RP, celui de la machine M2, fig. 3.14).

La machine M1 est différente des autres pour la raison suivante : possibilité d'exécution de deux traitements (tâche "I" et tâche "III"). La table des états fixes de M1 est présentée sur le tableau 3.10.

|              |                     |
|--------------|---------------------|
| Commande     | exécuter "Ti"       |
| Robot        | pièce ayant subi Ti |
| Pièce sur Mi | fin ti              |

Tableau 3.9

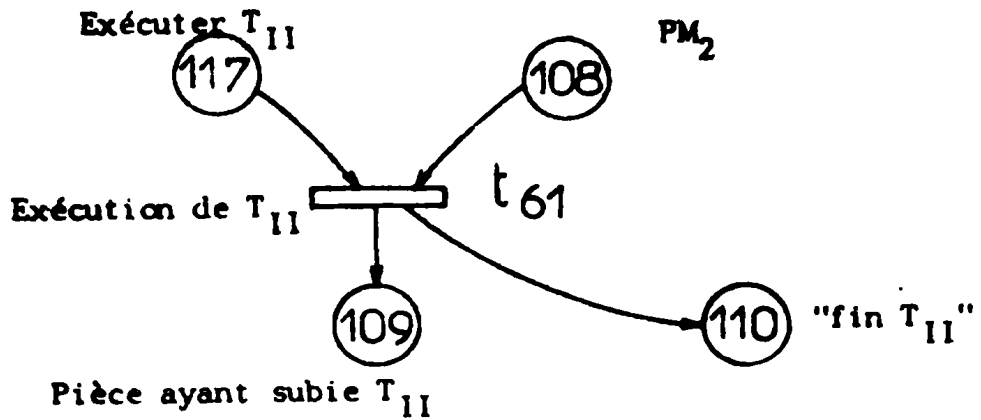


Fig. 3.14 - RPC de la machine M2

- place  $P_{90}$  : état initial de la machine M2
- place  $P_{117}$  : signal de la commande "exécution  $T_{II}$ "
- place  $P_{109}$  : état final de la machine M2
- place  $P_{110}$  : signal information de l'état final de la machine M2
- Transition 61 : exécution de la tâche  $T_{II}$ .

| Commande | exécuter $T_I$ | exécuter $T_{III}$ |
|----------|----------------|--------------------|
| Etat     |                |                    |
| $PM_1$   | $PT_I$         |                    |
|          | $fin_{T_I}$    |                    |
| $PM_2$   |                | $PT_{III}$         |
|          |                | $fin_{T_{III}}$    |

Tableau 3.10

- $PT_I$  : pièce ayant subie  $T_I$
- $PT_{III}$  : pièce ayant subie  $T_{III}$

Le réseau RP de l'opération traitement de la machine M1 est présenté sur la fig. 3.15.

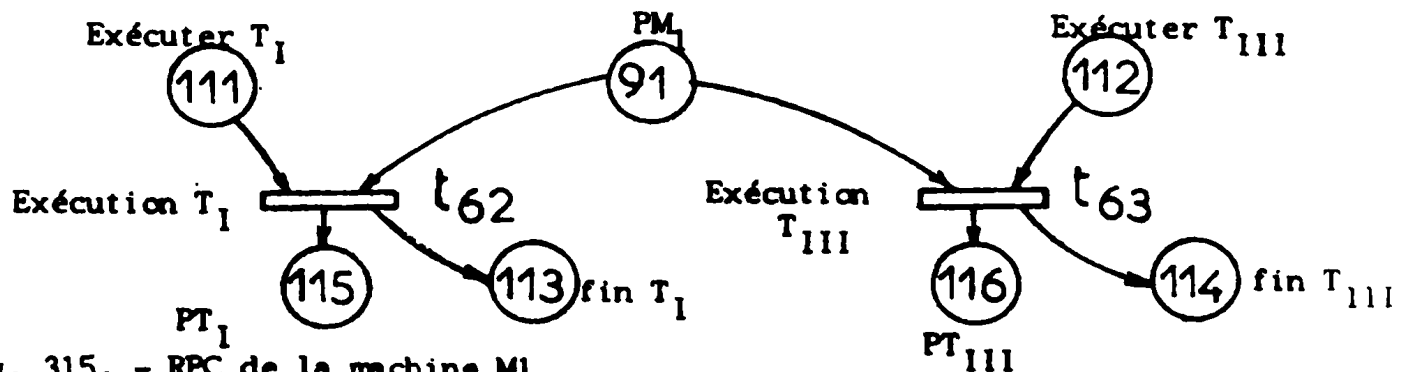


Fig. 3.15. - RPC de la machine M1

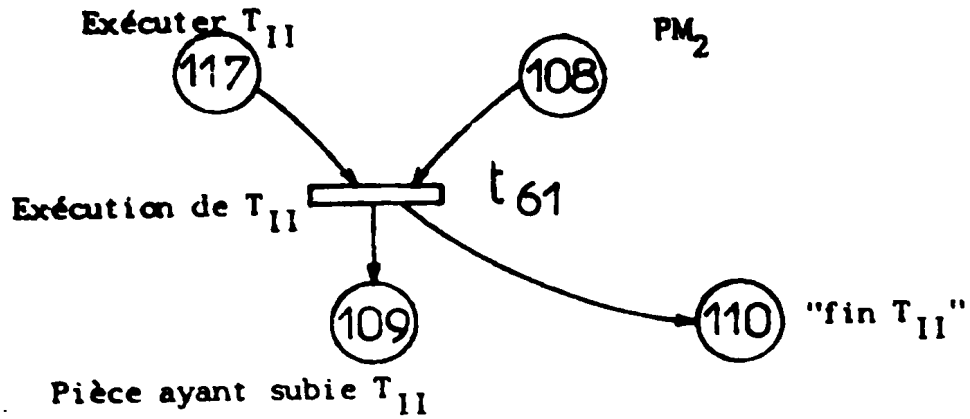


Fig. 3.14 - RPC de la machine M2

- place  $P_{90}$  : état initial de la machine M2
- place  $P_{117}$  : signal de la commande "exécution  $T_{II}$ "
- place  $P_{109}$  : état final de la machine M2
- place  $P_{110}$  : signal information de l'état final de la machine M2
- Transition 61 : exécution de la tâche  $T_{II}$ .

| Commande | exécuter $T_I$        | exécuter $T_{III}$            |
|----------|-----------------------|-------------------------------|
| Etat     |                       |                               |
| $PM_1$   | $PT_I$<br>$fin_{T_I}$ |                               |
| $PM_2$   |                       | $PT_{III}$<br>$fin_{T_{III}}$ |

Tableau 3.10

- $PT_I$  : pièce ayant subie  $T_I$
- $PT_{III}$  : pièce ayant subie  $T_{III}$

Le réseau RP de l'opération traitement de la machine M1 est présenté sur la fig. 3.15.

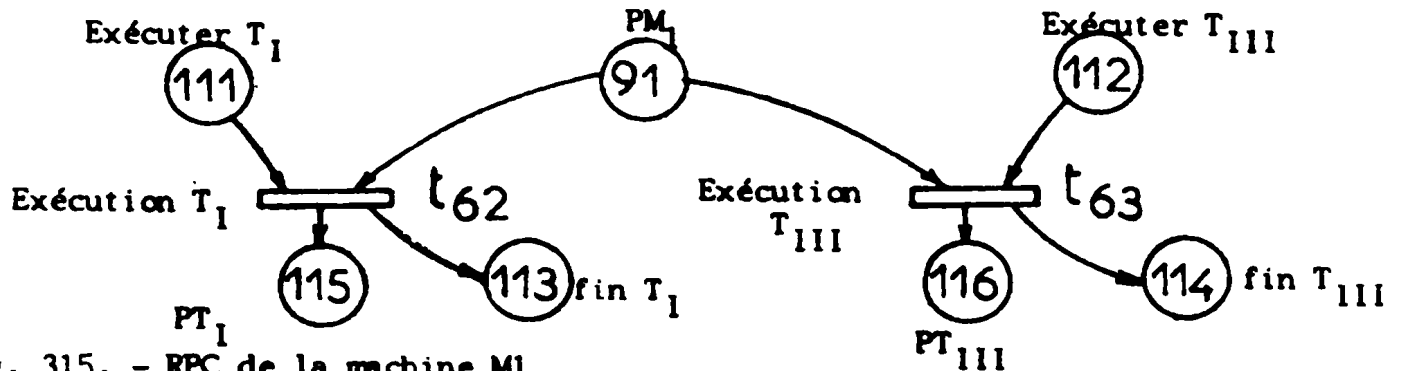


Fig. 3.15. - RPC de la machine M1

- places P91 : état initial de la machine  $M_1$  "PM<sub>1</sub>"
- places P111, P112 : signal de la commande "exécuter T<sub>i</sub>"
- places P113, P114 : signal information de fin T<sub>i</sub>
- places P115, P116 : état final de la machine  $M_1$
- transitions t<sub>62</sub>, t<sub>63</sub> : exécution des tâches T<sub>i</sub>

Remarque : Les phases d'activation et d'achèvement de l'opération traitement n'ont pas été représentées car elles sont quasi-identiques pour toutes les opérations de traitement à celles du robot mis à part la numérotation des places et des transitions qui changent.

### III.3.4. - RESEAU RP DE L'OPERATION LANCEMENT ET DEBRANCHEMENT :

Selon le cycle de fonctionnement du robot , présenté sur la fig. 1.3 (chapitre I), une opération de lancement est prévue à chaque début de cycle de fonctionnement et de même qu'une opération de débranchement à la fin du cycle. Les réseaux RPC de ces deux opérations (lancement et débranchement) sont présentés sur les figures 3.16 et 3.17. Ils ont été construits à partir des tableaux 3.11 et 3.12.

|              |               |
|--------------|---------------|
| Comande      | Brancher      |
| Etat         | Robot branché |
| Robot activé | Robot branché |

Tableau 3.11

Opération branchement

|         |                 |
|---------|-----------------|
| Comande | Débrancher      |
| Etat    | Robot débranché |
| RD. RSS | Robot débranché |

Tableau 3.12

Opération débranchement

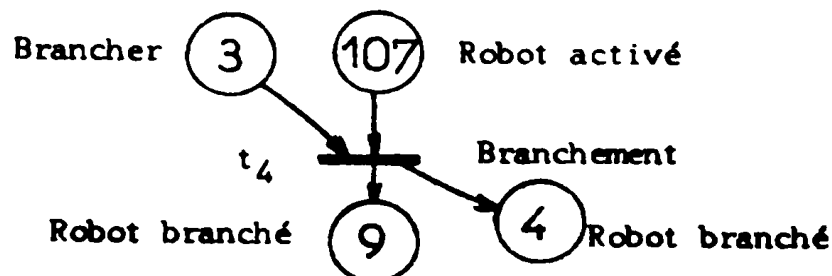


Fig. 3.16 - RPC de l'opération branchement

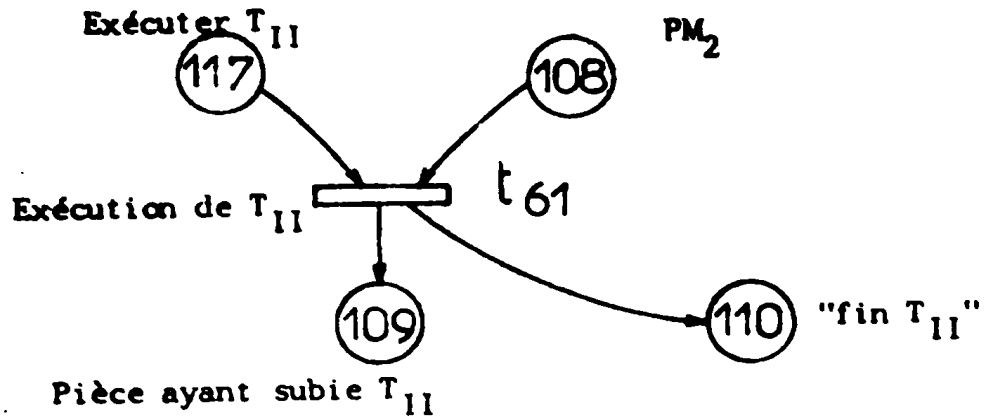


Fig. 3.14 - RPC de la machine M2

- place  $P_{108}$  : état initial de la machine M2
- place  $P_{117}$  : signal de la commande "exécution  $T_{II}$ "
- place  $P_{109}$  : état final de la machine M2
- place  $P_{110}$  : signal information de l'état final de la machine M2
- Transition 61 : exécution de la tâche  $T_{II}$ .

| Commande   | exécuter $T_I$ | exécuter $T_{III}$ |
|------------|----------------|--------------------|
| Etat       | $PT_I$         |                    |
| $PM_I$     | $fin_{T_I}$    |                    |
| $PM_{III}$ |                | $PT_{III}$         |
|            |                | $fin_{T_{III}}$    |

Tableau 3.10

- $PT_I$  : pièce ayant subie  $T_I$
- $PT_{III}$  : pièce ayant subie  $T_{III}$

Le réseau RP de l'opération traitement de la machine M1 est présenté sur la fig. 3.15.

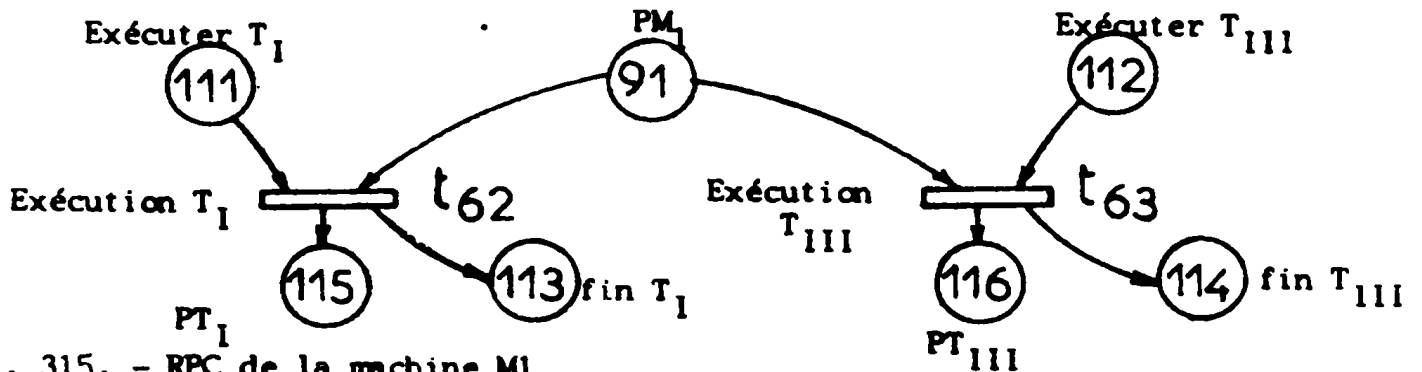


Fig. 3.15. - RPC de la machine M1

- places P91 : état initial de la machine  $M_1$  "PM<sub>1</sub>"
- places P111, P112 : signal de la commande "exécuter T<sub>i</sub>"
- places P113, P114 : signal information de fin T<sub>i</sub>
- places P115, P116 : état final de la machine  $M_1$
- transitions  $t_{62}, t_{63}$  : exécution des tâches T<sub>i</sub>

Remarque : Les phases d'activation et d'achèvement de l'opération traitement n'ont pas été représentées car elles sont quasi-identiques pour toutes les opérations de traitement à celles du robot mis à part la numérotation des places et des transitions qui changent.

### III.3.4. - RESEAU RP DE L'OPERATION LANCEMENT ET DEBRANCHEMENT :

Selon le cycle de fonctionnement du robot , présenté sur la fig. 1.3 (chapitre I), une opération de lancement est prévue à chaque début de cycle de fonctionnement et de même qu'une opération de débranchement à la fin du cycle. Les réseaux RPC de ces deux opérations (lancement et débranchement) sont présentés sur les figures 3.16 et 3.17. Ils ont été construits à partir des tableaux 3.11 et 3.12.

|              |               |
|--------------|---------------|
| Commande     | Brancher      |
| Etat         | Robot branché |
| Robot activé | Robot branché |

Tableau 3.11

Opération branchement

|          |                 |
|----------|-----------------|
| Commande | Débrancher      |
| Etat     | Robot débranché |
| RD. RSS  | Robot débranché |

Tableau 3.12

Opération débranchement

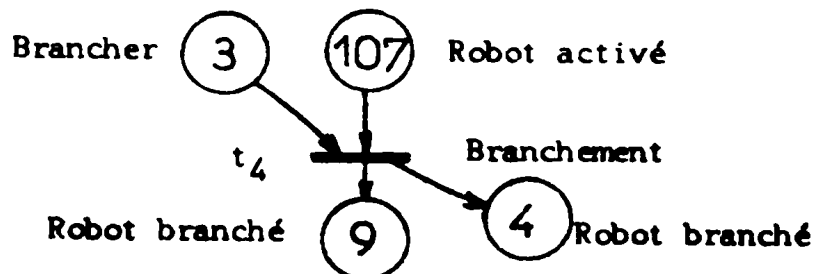


Fig. 3.16 - RPC de l'opération branchement



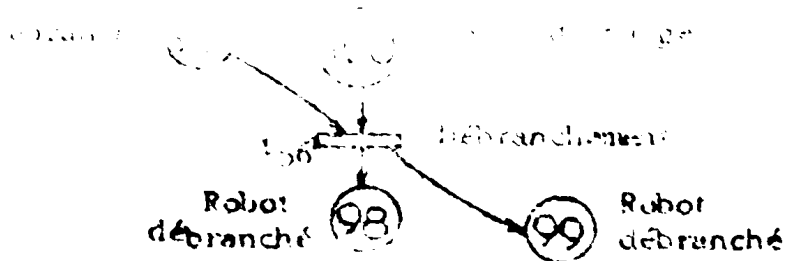


Fig. 3.17 - RPC de l'opération débranchement

### III.3.5. - ASSEMBLAGE DES RESEAUX

L'assemblage des réseaux RPC sera réalisé uniquement pour le RPC du robot, pour des raisons de clarté du schéma, on ne représente que le RPC des différentes opérations du robot transporteur. Cette opération d'assemblage est effectuée selon la procédure de construction du réseau RPC finale d'une opération (paragraphe 3.2.2., et étapes 7 et 8).

Le réseau RPC final de l'opération transport est représenté sur la fig. 3.18. Ce réseau est composé de :

- 107 places ;
- 58 transitions

L'état initial (marquage des places par un jeton) est représenté par les places :  $P_1 - P_{31} - P_{94}$ .

#### Conclusion :

1. L'absence d'une approche formalisée de la conception d'un modèle par les réseaux de Petri des systèmes de production provoque des difficultés d'utilisation.

En effet, la modélisation de ces systèmes par les RP se construit généralement d'une manière heuristique ce qui engendre des erreurs de conception du modèle. L'utilisation des méthodes de construction plus régulières et formalisées permettent de diminuer d'une façon notable ces erreurs. Une procédure formalisée de la construction du RP d'un objet a été développée.

2. La procédure développée a été appliquée sur l'exemple à étudier "module technologique robotisé". Le réseau RP du module possède une configuration complexe ce qui exige l'utilisation de méthodes d'analyse très développées pour étudier son fonctionnement.

- CHAPITRE IV -

ANALYSE DES RESEAUX DE PETRI CLASSIQUES

#### IV.2 ANALYSE DU RPC PAR ENUMERATION DES MARQUAGES ACCESSIBLES :

Le graphe des marquages accessibles est engendré par l'application successive à partir du marquage initial de la règle du tir des transitions sensibilisées. De chacun des marquages obtenus on recherche l'ensemble des transitions sensibilisées ; puis les marquages obtenus après le tir de chacune d'elles. Comme résultat, on obtient l'ensemble des marquages accessibles. En général ce graphe peut être infini. Il représente toutes les séquences de tirs possibles des transitions. Pour appliquer ce graphe en guise d'outil utile d'analyse il est nécessaire de trouver les moyens de limitation de sa dimension.

Ces moyens essentiels sont les suivants :

- si le marquage obtenu est égal à l'un de ses prédécesseurs la branche du graphe est abandonnée.
- si le marquage obtenu est une impasse, c'est à dire ce marquage ne sensibilise aucune transition, la branche du graphe est aussi abandonnée.

La procédure de construction du graphe peut être arrêtée s'il y a un marquage supérieur.

Définition 4.1. :

Un marquage  $M$  de  $\overline{Mo}$  est supérieur à un marquage  $M'$  de  $Mo$  ssi :

$$\begin{array}{ll} \forall p \in P & M(p) \geq M'(p) \\ \exists \alpha \in P & M(\alpha) > M'(\alpha) \end{array}$$

Théorème 4.1. :

Soit  $M'$  un marquage de  $Mo$ , s'il existe  $M$  de  $\overline{Mo}$  tel que  $M'$  soit supérieur à  $M$ . Le réseau est soit non borné, soit non vivant.

Donc si le marquage obtenu est supérieur à l'un de ses prédécesseurs, la procédure est arrêtée puisque d'après le théorème le réseau est soit non borné, soit non vivant. La procédure se termine car tous les marquages possibles ont été traités et l'ensemble des marquages obtenus non supérieurs à  $Mo$  est fini.

L'algorithme de construction du graphe des marquages accessibles est représenté sur la fig. 4.1. Un programme en FORTRAN a été conçu à partir de cet algorithme et réalisé sur VAX - 750.

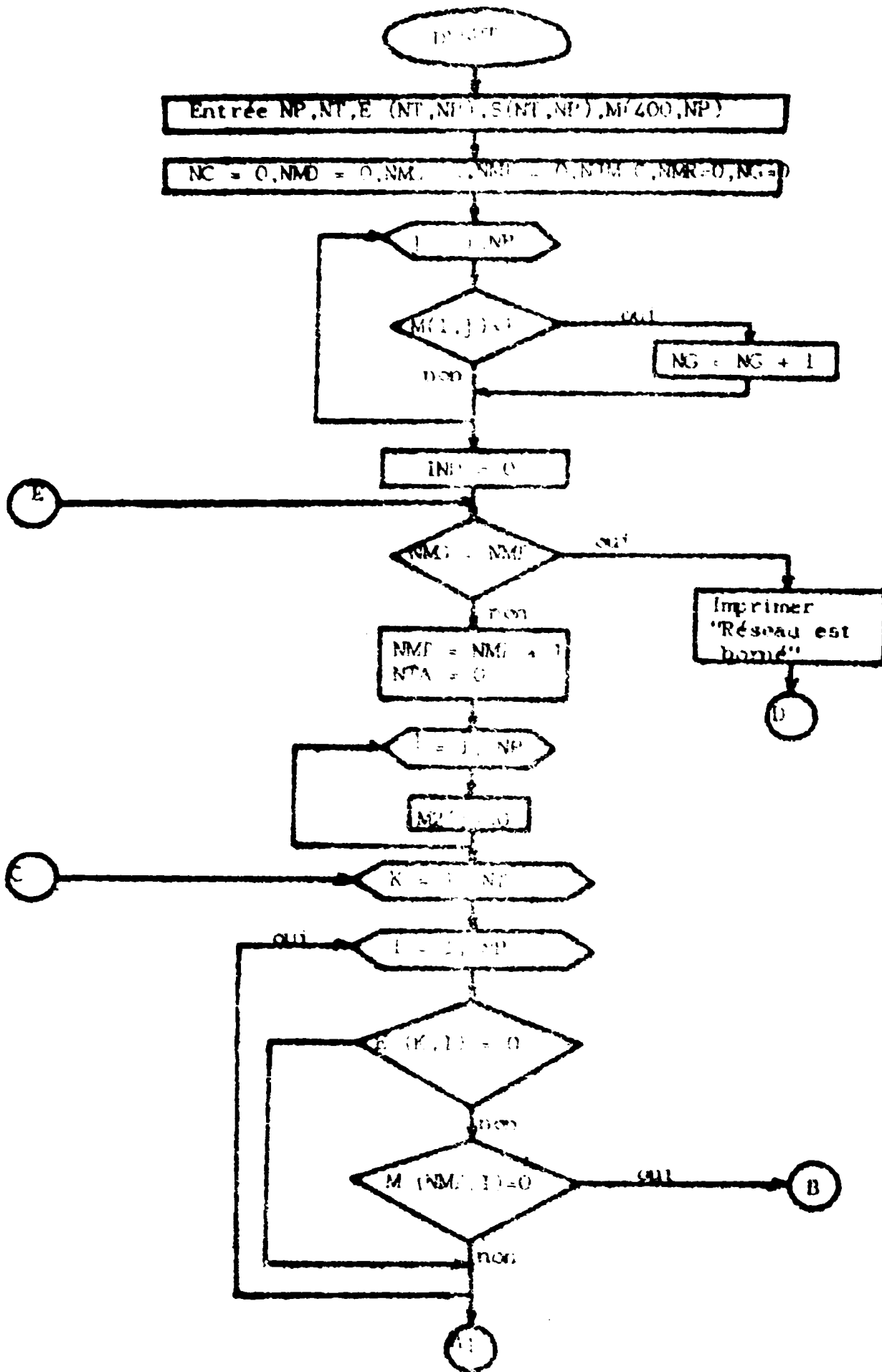


Fig. 4.1. - Algorithme de construction du graphe des marquages accessibles.

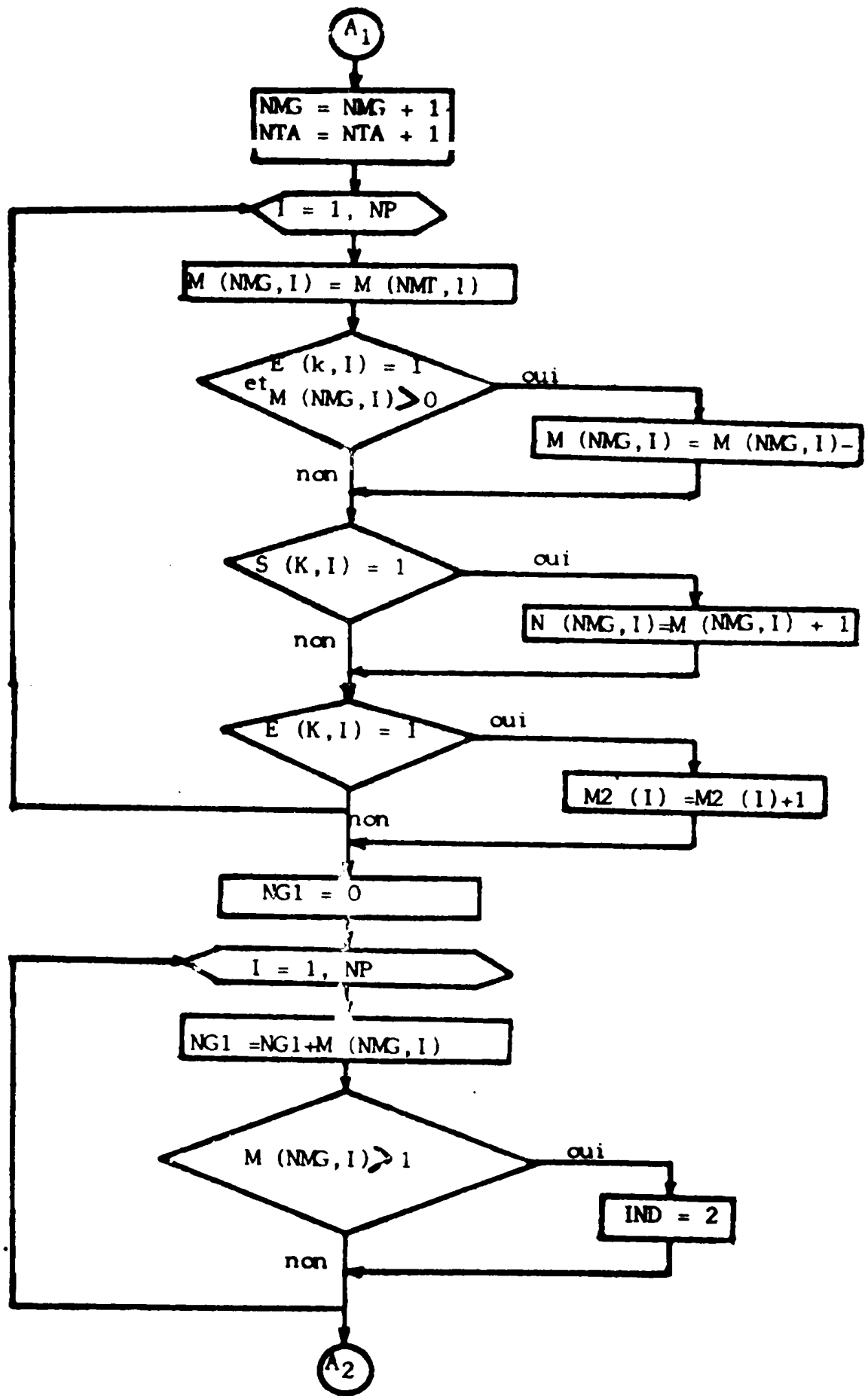


Fig. 4.1. (suite)

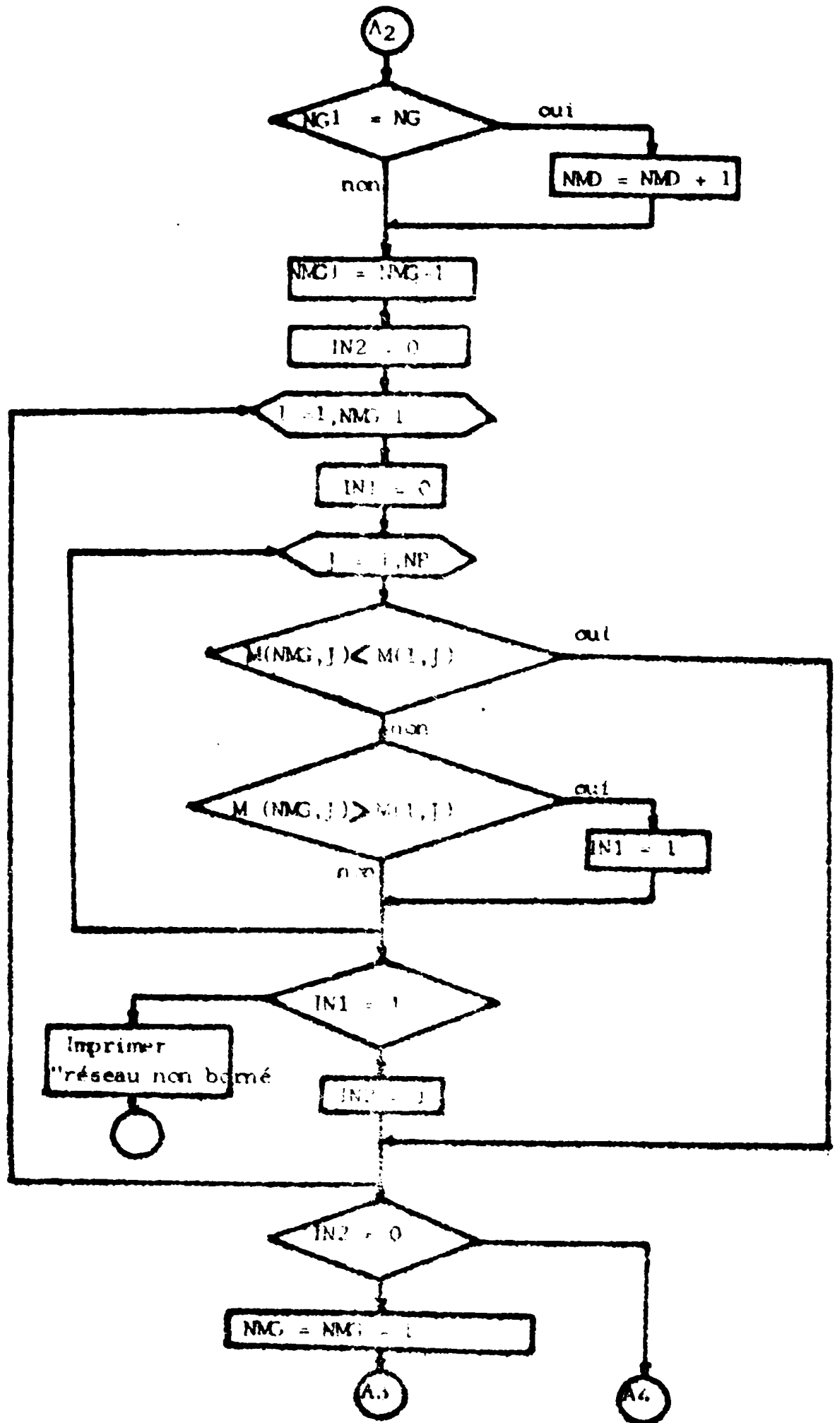


Fig. 4.1. (suite)

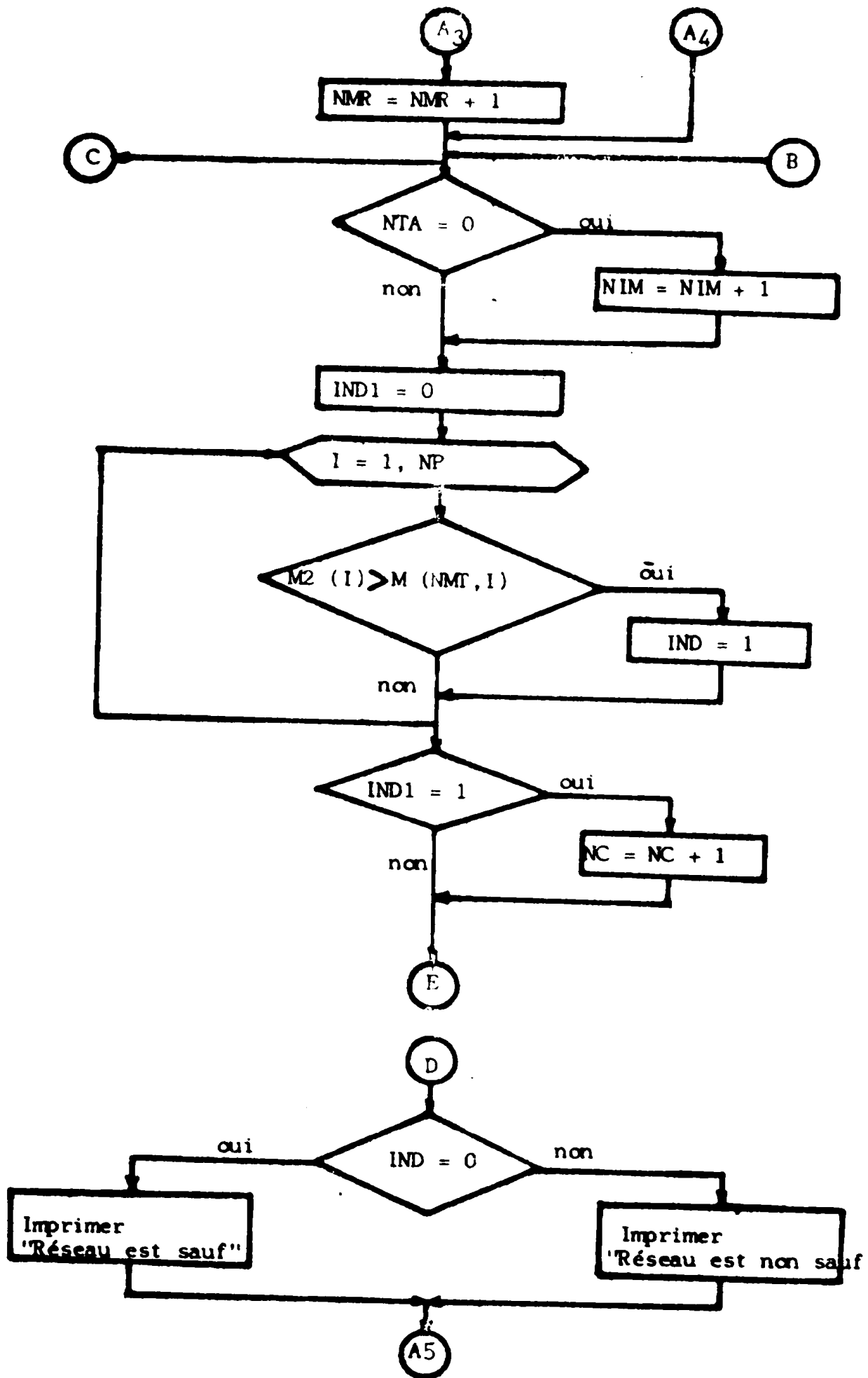
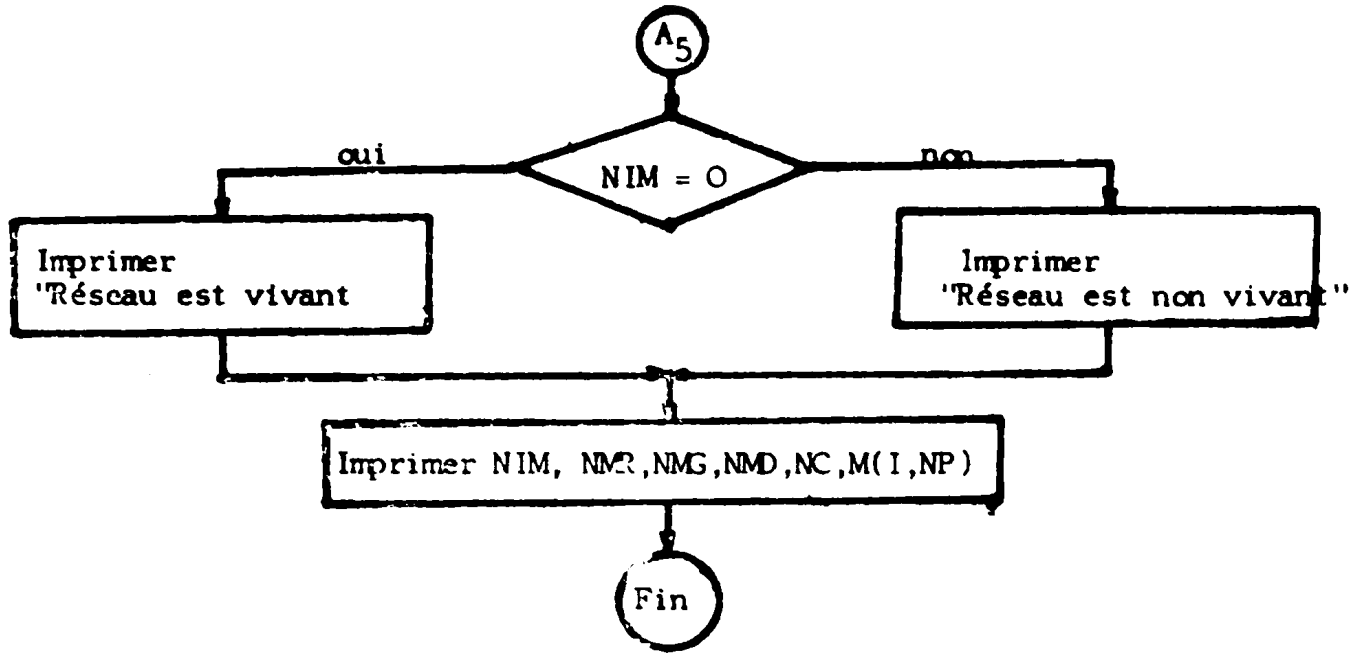


Fig. 4.1. (suite)



|            |  |
|------------|--|
| NP         | : nombre de places   |
| NT         | : nombre de transitions  |
| E (NT, NP) | : Tableau d'entrée   |
| S (NT, NP) | : tableau de sortie  |
| M (I, NP)  | : tableau de la description de l'état initial du réseau                                |
| NMG        | : nombre de marquages générés  |
| NMT        | : nombre de marquages traités  |
| NMR        | : nombre de marquages répétitifs   |
| NMD        | : nombre de marquages avec le nombre de jetons différent de celui du marquage initial. |
| NC         | : nombre de marquages engendrent des conflits  |
| NG         | : nombre de jetons.  |

Fig. 4.1. (suite)



La méthode qui semble la plus adaptée à notre modèle est l'abstraction des réseaux.

On introduit tout d'abord une notion d'équivalence fonctionnelle : "deux réseaux sont équivalents s'ils consomment et produisent de la même façon sur leur frontière. Donc si deux ou plusieurs réseaux sont équivalents dans le sens fonctionnel, ces réseaux peuvent être remplacés par un seul réseau qui conserve les mêmes propriétés que tous les réseaux substitués. Cette substitution ne modifie pas les propriétés et la structure du réseau et garde la sémantique des places et des transitions. L'application de cette méthode est présentée dans l'exemple suivant :

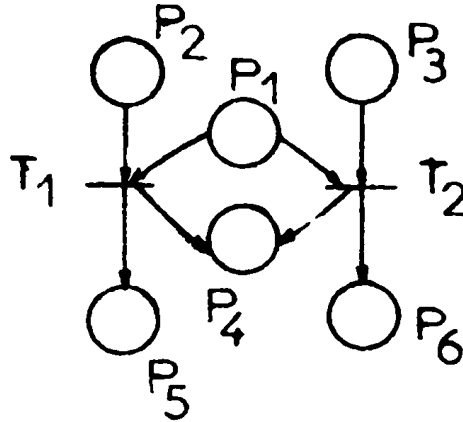


fig. 4.2.

Soit le réseau de la fig. 4.2. dont les places P2 et P3 ont la même interprétation fonctionnelle, de même pour P5 et P6. L'application du principe de l'abstraction des réseaux nous donnera le réseau réduit suivant :

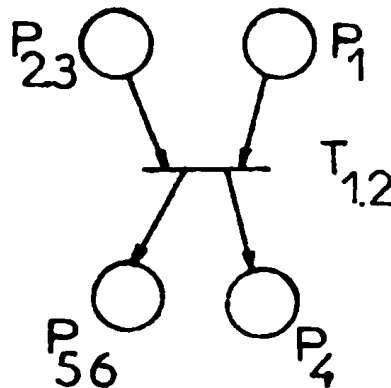


Fig. 4.3.

- Les places P2 et P3 ont été regroupées en une seule place P23, de même pour les places de sortie P5 et P6 en P56 ;
- Les transitions T1 et T2 ont été regroupées en une seule transition T12

Le réseau réduit obtenu par abstraction conserve les mêmes propriétés que le réseau initial.

La méthode de réduction par abstraction sera appliquée au réseau RP du module technologique, afin de simplifier le réseau, ou plus exactement un ensemble de sous réseaux : déchargement, chargement, déplacement, traitement. Les phases activation et achèvement ne nécessitent pas de réduction car leur réseau RP est composé d'une seule transition.

#### IV.4 ANALYSE DU RP DU MODULE A ETUDIER :

##### IV.4.1. - REDUCTION DES RESEAUX RP DES DIFFERENTES OPERATIONS :

##### a) Réduction du RP de l'opération de déplacement :

Le réseau à étudier est présenté sur la fig. 3.9, il comporte 48 places et 38 transitions. Les places commandes P10, P11, ... P23 ont tous la même fonction :

- déplacement pas à pas du robot entre deux machines successives.

Selon le principe de l'abstraction ces places - commandes peuvent être regroupées en une seule place qu'on intitulera "déplacer le robot vers  $M_i$ ". Cette place est toujours marquée par un jeton. On applique le même raisonnement pour les places - informations P32, ... P39 qui seront remplacées par une seule place intitulée "robot près  $M_i$ ". Les transitions sont regroupées en une seule transition "t2". Le réseau RP réduit de cette opération est représenté sur la fig. 4.4. Il est composé de onze (11) places et trois (03) transitions.

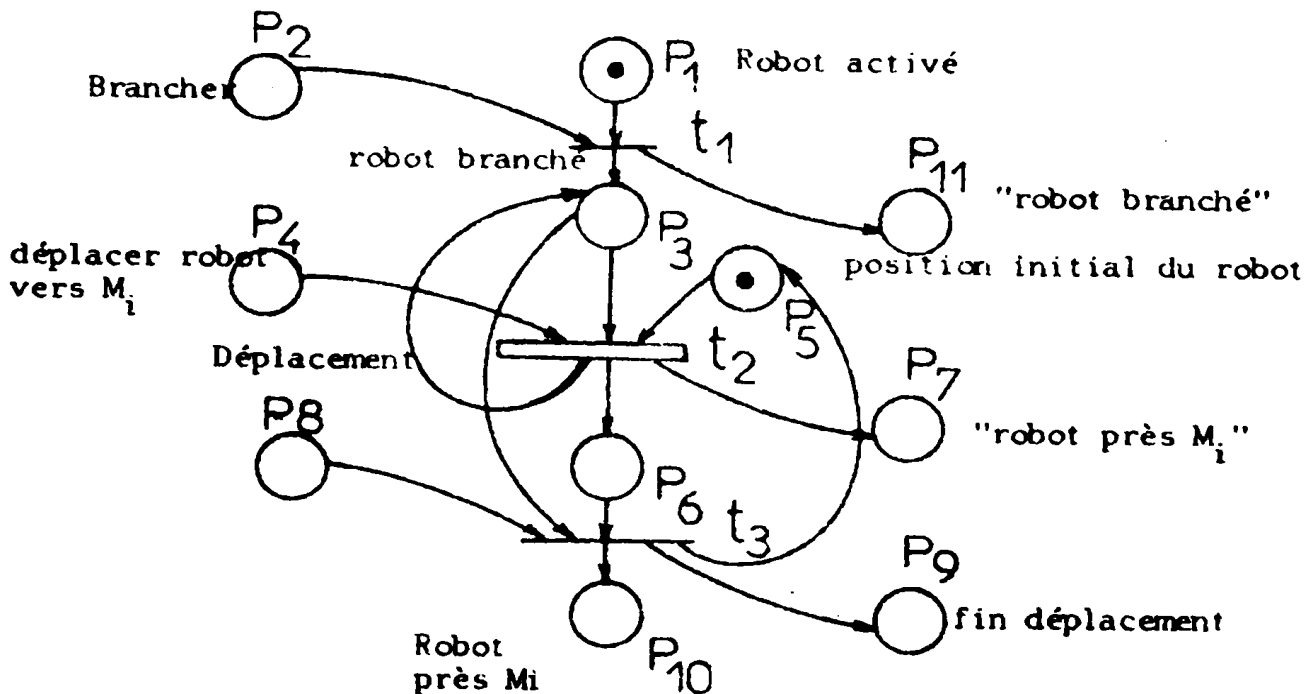


Fig. 4.4. - réseau RP réduit de l'opération "déplacement".

Remarque : L'opération branchement a été introduite dans ce réseau.

b) Réduction du réseau RP de l'opération "chargement" :

Ce réseau est composé de 24 places et 5 transitions (fig. 3.10). Les places P48,...P53 sont regroupées en une seule place "robot près Mi". Les places P56,...P60 sont remplacées par une seule place "Pti" (pièce ayant subie la tâche  $t_1$ ). Les transitions  $t_2, \dots, t_6$  sont remplacées par une seule transition " $t_4$ ". Le réseau RP réduit est présenté sur la fig. 4.5. Il comporte huit places et une transition.

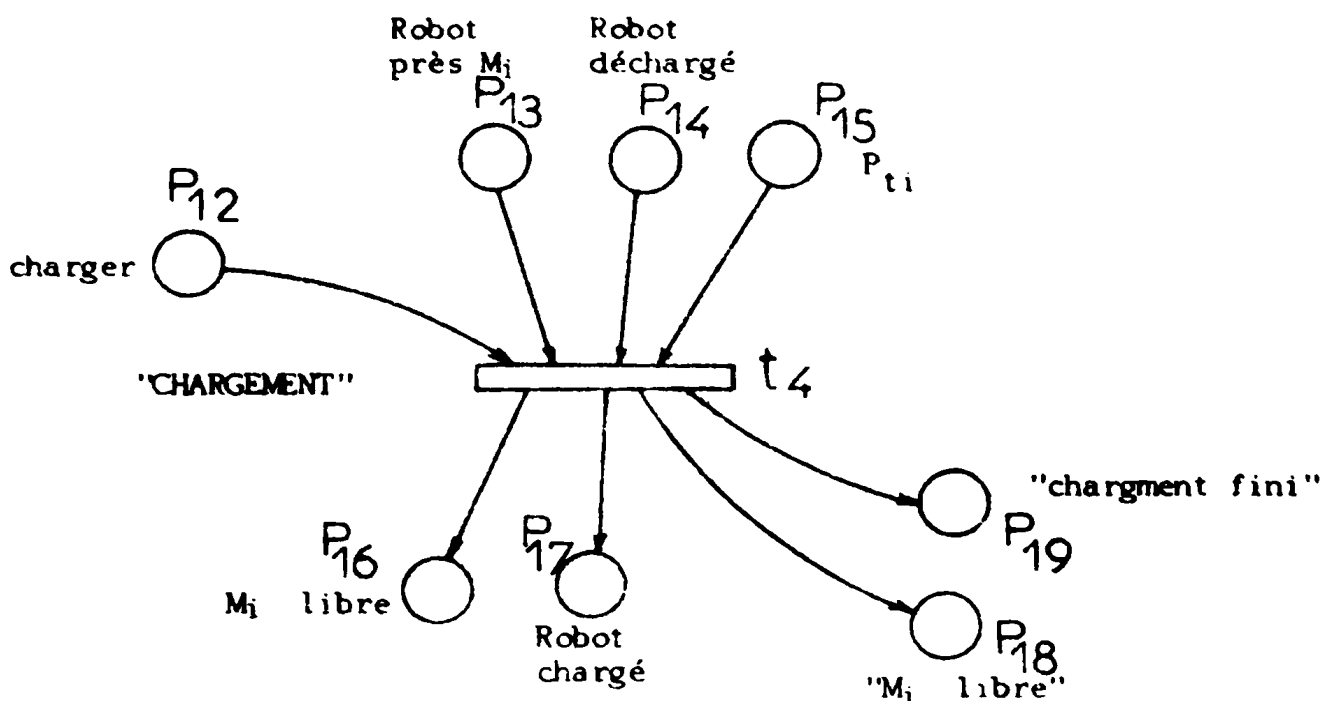


Fig. 4.5. - Réseau RP réduit de l'opération chargement.

c) Réduction du réseau RP de l'opération "déchargement" :

Le réseau RP de la fig. 3.11 est réduit de la même façon que celui de l'opération chargement. En effet, les places P48,...P55 sont regroupées en seule place "robot près Mi". Les places P71,...,P77 sont remplacées en une seule place "Mi libre". Les transitions  $t_7, \dots, t_{13}$  sont remplacées par une seule transition " $t_5$ ". De la même façon les places état P78,...P84 et les places - informations P85,...,P91 sont remplacées par les places P<sub>Mi</sub> (pièce sur la machine Mi). Les substitutions étant faites, on obtient le réseau RP réduit de l'opération déchargement (fig. 4.6). Il comporte huit (08) places et une (01) transition.

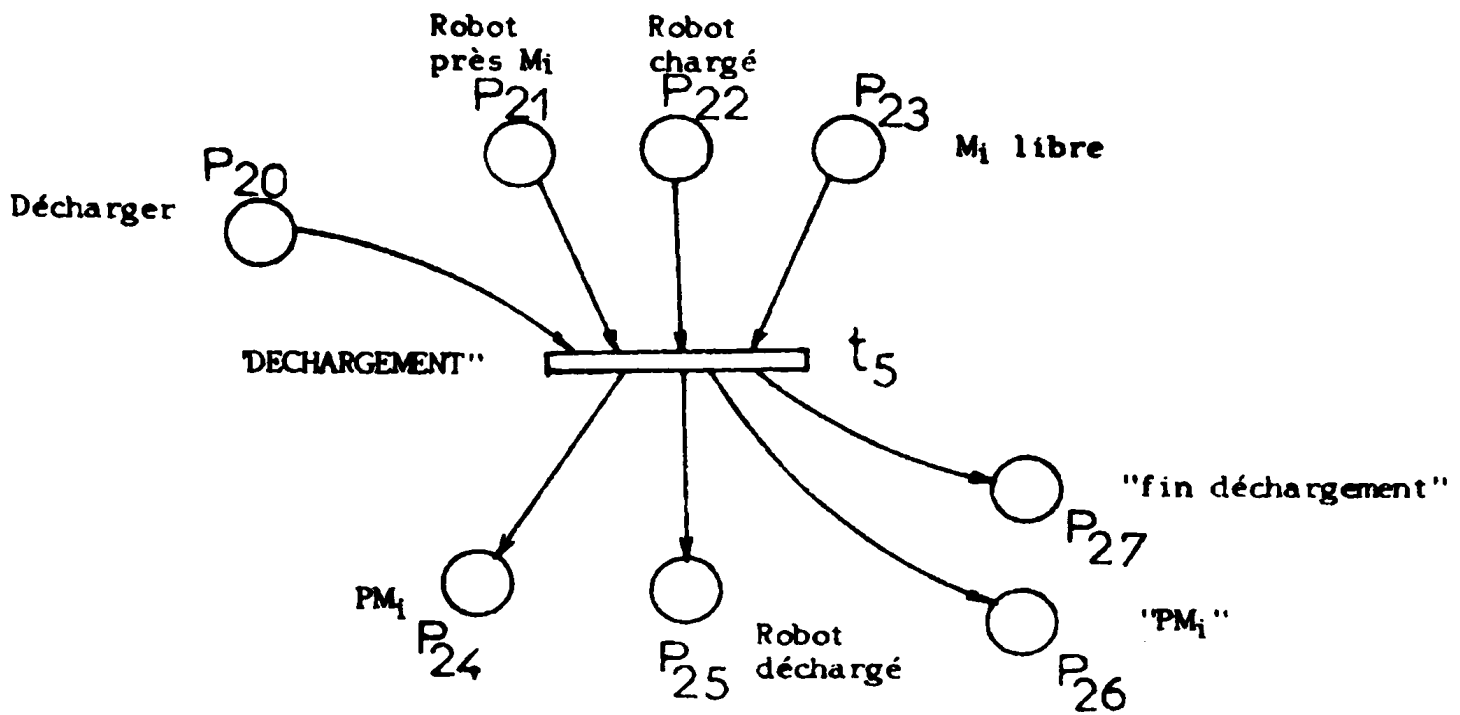


Fig. 4.6. - Réseau RP réduit de l'opération "déchargement"

Remarque :

Le réseau de l'opération débranchement sera représenté sur le réseau réduit final à la fin de l'opération déchargement.

d) - Réduction de l'opération traitement :

Le réseau RP de l'opération "traitement" dans le cas des machines M2, M3, M4 (fig. 3.14) ne subira pas de réduction étant donné qu'il est formé lui même d'une seule transition. Par contre le réseau RP de machine M1 (fig. 3.15) est réduit au réseau RP représenté sur la fig. 4.7. après regroupement des places P111, P112 en une seule place "P31", de même les places informations P113, P114 en une seule place "P34". Les transitions t62, t63 sont remplacées par une transition "t6".

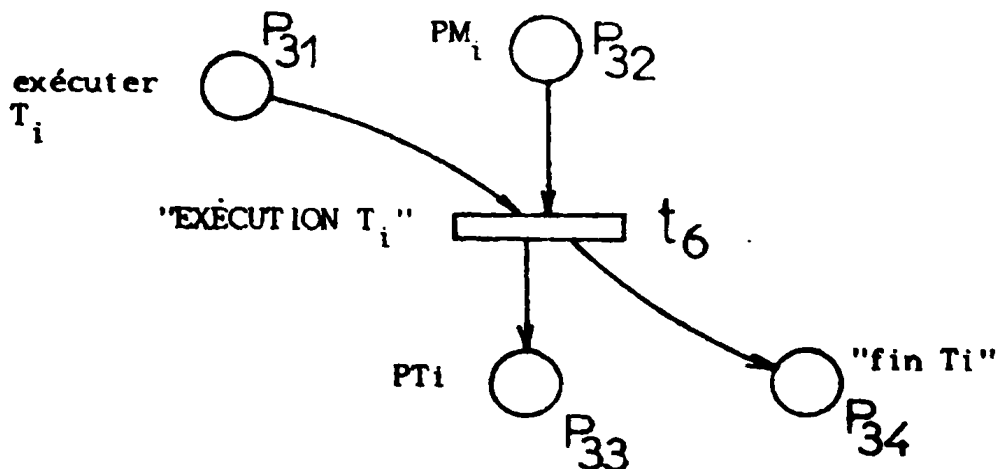


Fig. 4.7. - Réseau RP réduit de l'opération traitement.

#### IV.4.2. - RESEAU REDUIT DU MODULE TECHNOLOGIQUE :

On construit le RP réduit du module à étudier en assemblant les réseaux réduits présentés sur les fig. 4.4. - 4.5. - 4.6 - 4.7. Cet assemblage s'effectue par la liaison des places communications, en prenant en considération la présence implicite de l'algorithme de commande qui assure l'apparition des jetons nécessaires dans les places de commande en fonction des états du réseau. Deux méthodes possibles sont applicables. Dans le premier cas, si un signal de commandes fixé (jeton dans la place  $P_k$ ) se produit selon l'algorithme de commande automatiquement sur la base d'information fixée en provenance du réseau (jeton dans la place  $P_s$ ), on peut utiliser une liaison supplémentaire (voir fig. 4.8) assurant l'apparition d'un jeton dans  $P_k$ .

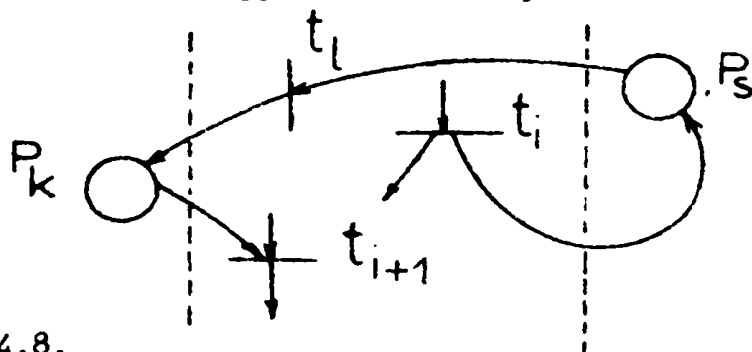


Fig. 4.8.

Les transitions  $t_i$  et  $t_{i+1}$  sont les transitions de base du réseau. La transition artificielle  $t_l$  a été utilisée pour assurer la liaison correcte (ou logique) des places  $P_s$  et  $P_k$ . L'interprétation du passage du jeton par cette transition est évidente : c'est un traitement du message  $P_s$  dans l'ordinateur. Si le temps de ce traitement est négligeable par rapport à la durée des opérations technologiques, on peut simplifier ce fragment du réseau en procédant de la manière suivante -

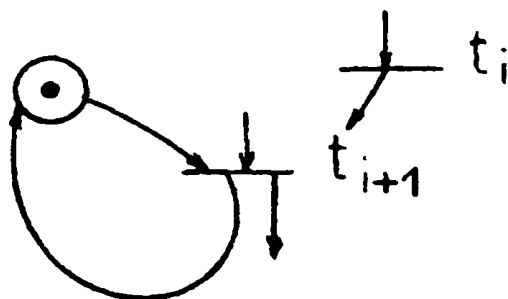


Fig. 4.9.

C'est à dire, en éliminant la liaison entre  $P_s$  et  $P_k$  et en assurant simultanément la présence d'un jeton dans la place  $P_k$ .

Dans le deuxième cas, quand l'algorithme d'élaboration d'un signal de commande dépend d'une part de l'information courante en provenance du réseau et d'autre part, de la pré-histoire de la situation considérée, il faut préciser la structure d'algorithme et l'exprimer par un réseau supplémentaire. Par exemple, s'il y a la nécessité selon l'algorithme, d'assurer le franchissement des transitions du réseau  $t_i, t_{i+1}, t_{i+R}$  dans l'ordre croissant de leurs indices, on peut utiliser le réseau supplémentaire suivant :

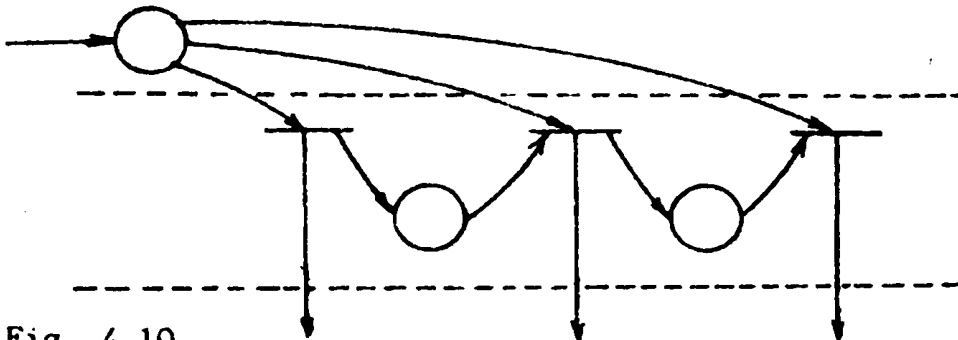


Fig. 4.10.

L'utilisation de cette méthode, nous a permis d'obtenir le réseau réduit du module, qui est présenté sur la fig. 4.14 L'application des méthodes classiques de réduction (BRAMS 83) et la précision de l'algorithme de commande ont permis à partir de ce réseau réduit d'obtenir la réduction finale correspondant à l'ordre d'utilisation des machines :

$M_1 \text{ ---} \rightarrow M_2 \text{ ---} \rightarrow M_3 \text{ ---} \rightarrow M_1 \text{ ---} \rightarrow M_4$

Remarque :

Sur la fig. 4.14 un fragment d'algorithme est présenté. Le réseau RP réduit final du module technologique est présenté sur la fig. 4.15.

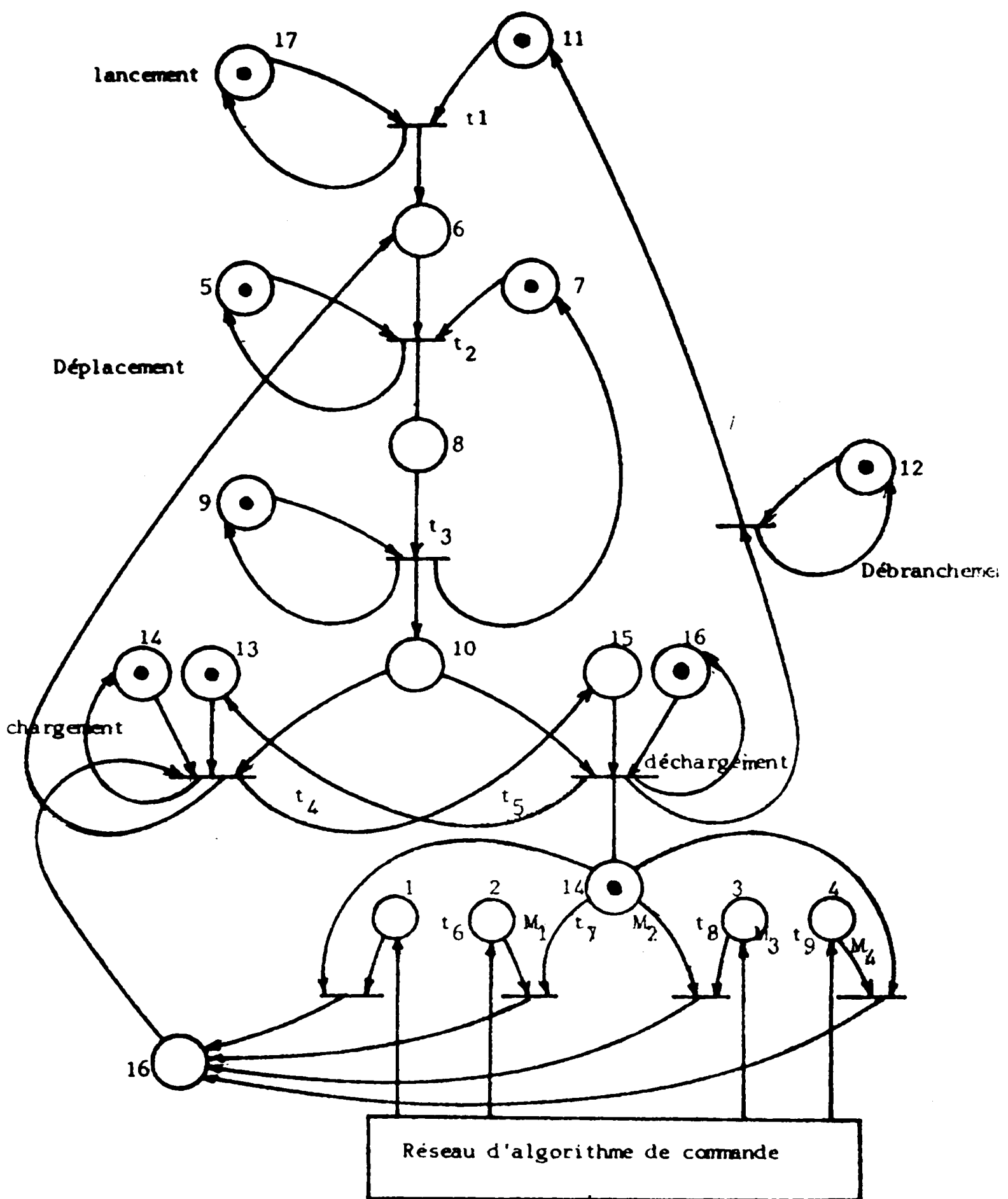


Fig. 4.14. - Réseau réduit du module technologique.

#### IV.4.3. - ANALYSE PAR ORDINATEUR :

L'analyse par ordinateur du réseau réduit final du module technologique a permis de vérifier les propriétés de "bon fonctionnement". Ces résultats sont présentés dans l'annexe.

##### Conclusion :

1. - La méthode énumérative des états pour l'étude des propriétés au RPC a été choisie en guise d'outil d'analyse. Cette méthode peut être appliquée à tout réseau, quelle que soit sa structure. Cependant une limitation ne doit pas être omise. Cette limite est que, même pour un RPC borné, le nombre de marquage peut être très grand. Pour pallier à cette difficulté, un algorithme de construction et d'analyse de graphe des marquages accessibles a été développé, un programme correspondant à cet algorithme a été réalisé sur le VAX 750.
2. - deuxième approche possible qui permet de surmonter le problème de l'explosion combinatoire des états, consiste à utiliser des méthodes de réduction. Ces méthodes ont été appliquées au RP au module technologique robotisé.
3. - L'utilisation d'un programme d'analyse par ordinateur des RP et des méthodes de réduction pour le RP du module à étudier a démontré que ce réseau possède des propriétés de "bon fonctionnement".



- CHAPITRE V -

- ANALYSE DES RESEAUX DE PETRI TEMPORISES -

## V.1. - INTRODUCTION :

Deux approches différentes ont été développées pour l'analyse des RPT. La première procède par énumération et repose sur le concept de classes d'états. Celui-ci permet de construire un graphe représentatif du comportement de l'objet à étudier (graphe d'états) . La seconde s'appuie sur les propriétés structurelles du réseau, caractérise ses fonctionnements périodiques à vitesse minimale et maximale.

Une comparaison entre les deux méthodes d'analyse, montre que la recherche des fonctionnements périodiques ne requiert pas d'énumération et s'effectue par des calculs matriciels ; cela la rend certainement plus efficace que l'approche énumérative, pour une certaine classe structurelle des réseaux ; l'approche énumérative en revanche est plus générale et s'applique à tout réseau de Petri temporel borné. Ce dernier point, indécidable, est au demeurant une limitation commune aux deux méthodes d'analyse. Cependant, dans le cadre de l'analyse énumérative les conditions suffisantes établies ((MENASIB: 82) se sont avérées satisfaisantes pour les applications traitées jusqu'à présent.

On a choisi la méthode énumérative en guise d'outil d'analyse des RPT. Le principe d'énumération a été présenté dans le chapitre I. L'analyse consiste à construire un graphe des classes d'états accessibles en utilisant la règle de tir des transitions des RPT.

Il faut noter que le graphe n'est pas toujours fini, mais il est possible de montrer que si le réseau est borné ce graphe est fini.

## V.2. - ANALYSE DES RPT PAR ENUMERATION DES CLASSES D'ETATS :

La méthode d'analyse, dont le fondement a été étudié au chapitre I, permet de générer un arbre d'états. A chaque noeud de cet arbre est associé un état qui représente une classe d'états du réseau  $Q_i = (M_i, X_i)$ ; où  $M_i$  est le marquage fixe et  $X_i$  est l'étiquette temporelle, il représente un ensemble de vecteurs contenu dans l'espace de tir  $\mathcal{O}(M)$  de  $Q_i$ .

A partir d'un état initial  $Q_0 = (M_0, X_0)$ , on construit un arbre de classes d'état selon la procédure suivante :

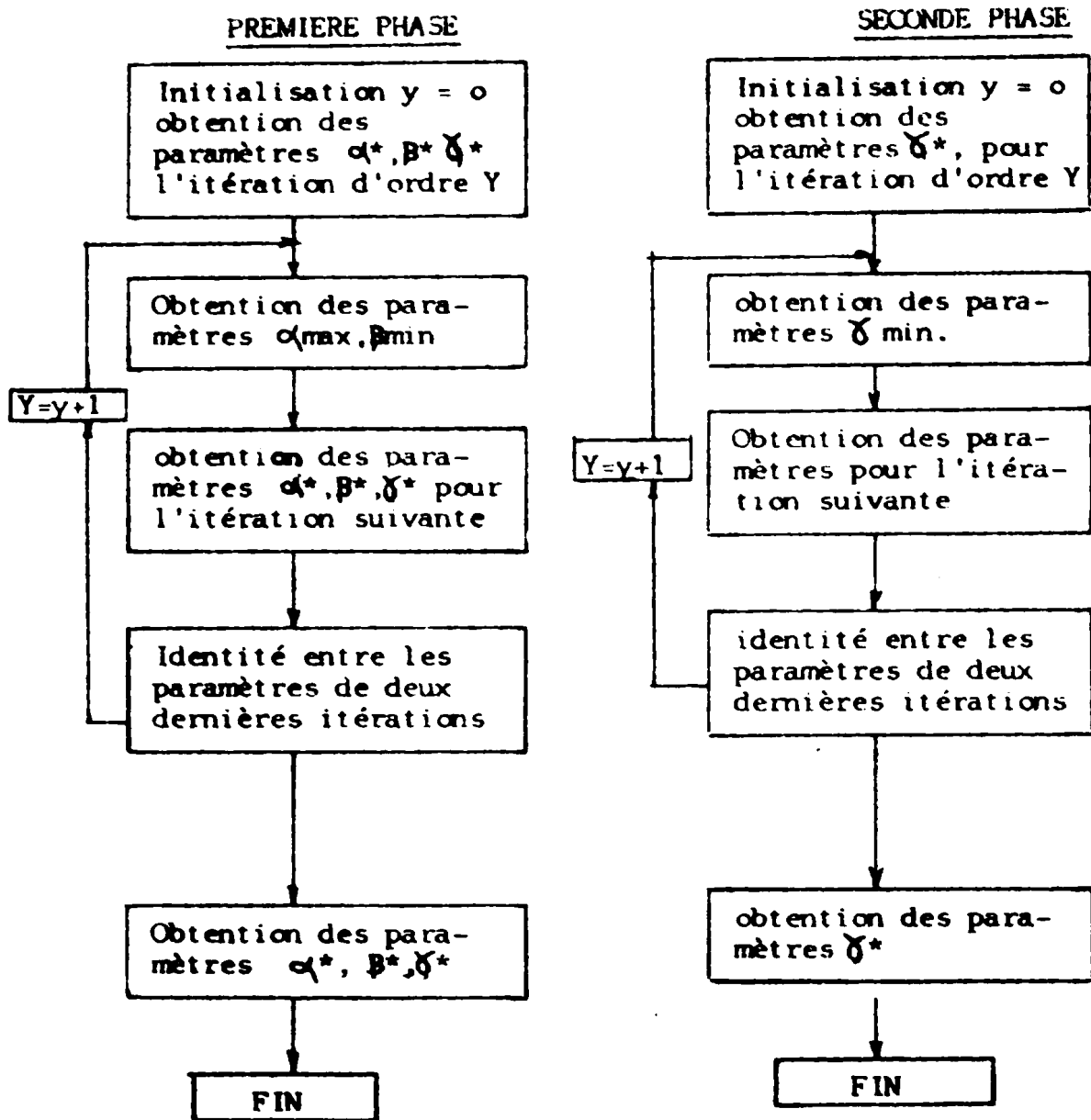


Fig. 5.1. - Organigramme de l'algorithme d'obtention de la forme canonique.

La procédure de la construction de l'arbre des états est arrêtée pour un nombre d'états fixés dans le cas des réseaux non bornés. Par contre, la finitude de l'arbre des classes d'états est réalisée pour les réseaux bornés.

Les classes d'états définies par l'analyse d'énumération permettent la vérification des séquences d'événements possibles sur des systèmes réels. L'analyse des performances peut s'effectuer à partir du graphe d'états en inspectant les branches de l'arbre :

1. - Le temps minimal possible  $T_{\min}(k,s)$  du passage d'un état initial  $Q_k$  à un autre final aussi fixé  $Q_s$  est déterminé selon la formule suivante :

$$T_{\min}(k,s) = \min \sum_j a \cdot i(j) \quad (5.1)$$

j iE jème branche qui relie  $M_k$  et  $M_s$ .

2. - Le temps maximal possible  $T_{\max}(k,s)$ , des mêmes états initial et final, se calcule selon l'expression suivante :

$$T_{\max}(k,s) = \max \sum_j b \cdot i(j) \quad (5.2)$$

j iE jème branche qui relie  $M_k$  et  $M_s$ .

Les états  $Q_k$  et  $Q_s$  peuvent être considérés comme étant représentatifs des états possibles d'un système à étudier. Les formules (5.1) et (5.2) offrent la possibilité d'estimer le temps de passage  $T$  :  $T_{\min}(k,s) \leq T(k,s) \leq T_{\max}(k,s)$ .

Exemple :  $Q_k = (M_k, X_k)$  et  $Q_s = (M_s, X_s)$  où :

$M_k$  : position initiale d'une pièce à l'entrée du module avant le traitement.

$M_s$  : position finale de cette pièce à la sortie du module à la fin du traitement.

Le temps  $T(k,s)$  peut être interprété comme étant l'estimation de la productivité du module.

#### V.2.1. - ORGANIGRAMME DE LA METHODE D'ENUMERATION DES ETATS :

La méthodologie considérée devient complexe à cause de l'augmentation du nombre d'états lors de l'analyse d'un système réel. L'utilisation d'un programme d'analyse par ordinateur s'avère donc nécessaire, un organigramme (fig. 5.2) a été élaboré à partir de l'algorithme d'énumération des états. Ce programme peut être appliqué à n'importe quel système dont la modélisation de son fonctionnement a été réalisée par l'intermédiaire des réseaux de Petri temporisés

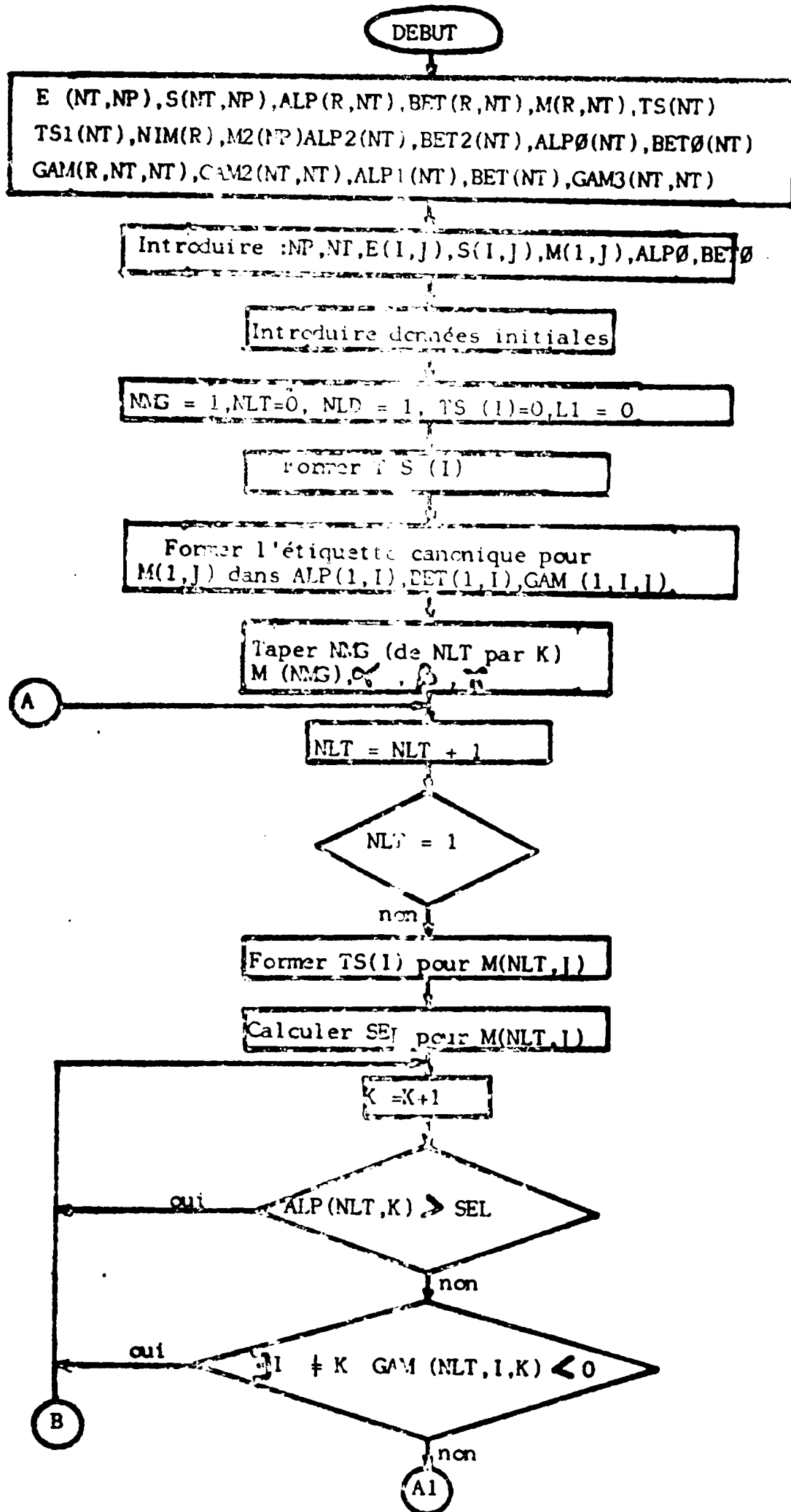


Fig. 5.2. - Algorithme de construction du graphe des classes d'états

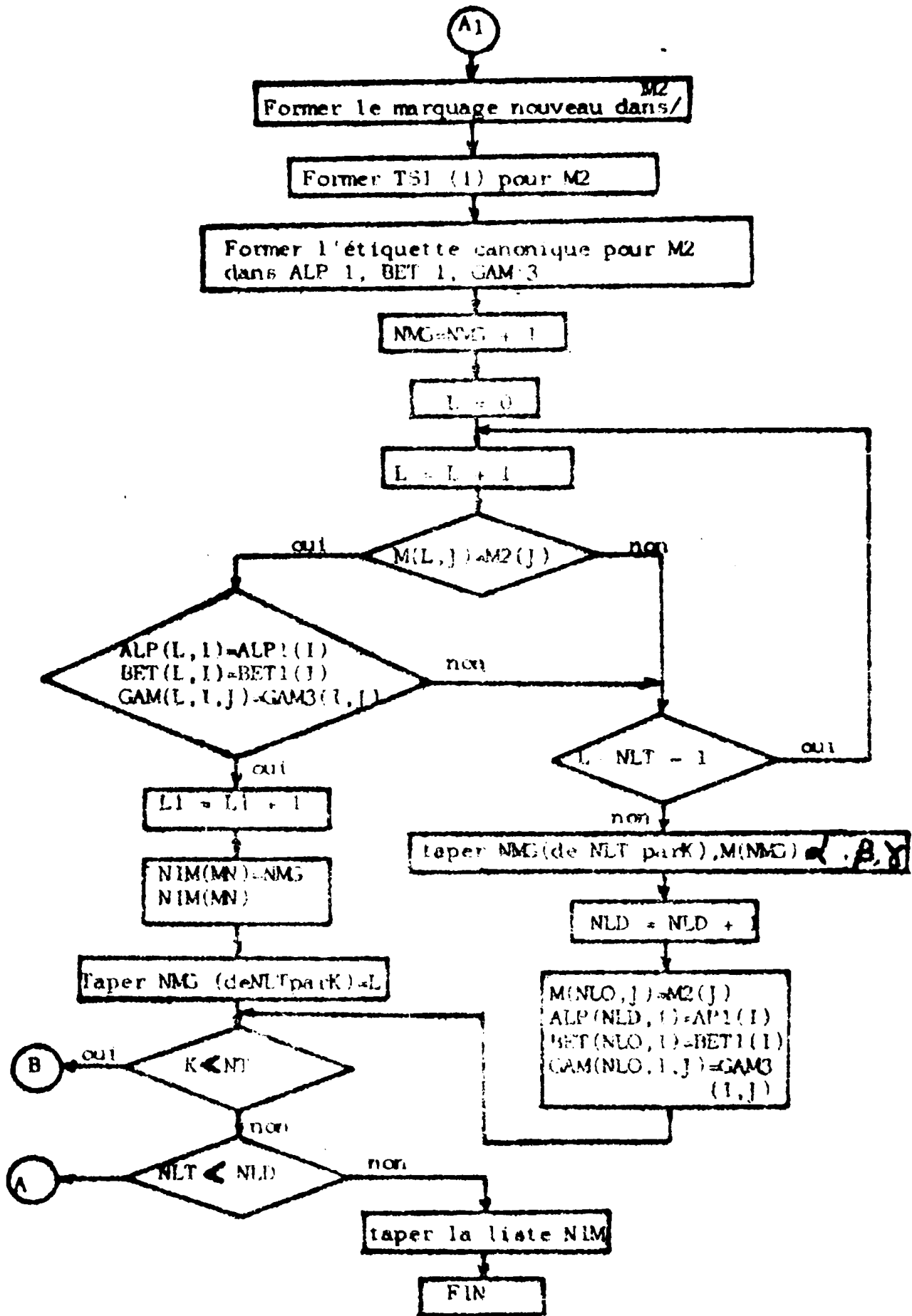


Fig. 5.2. (suite)

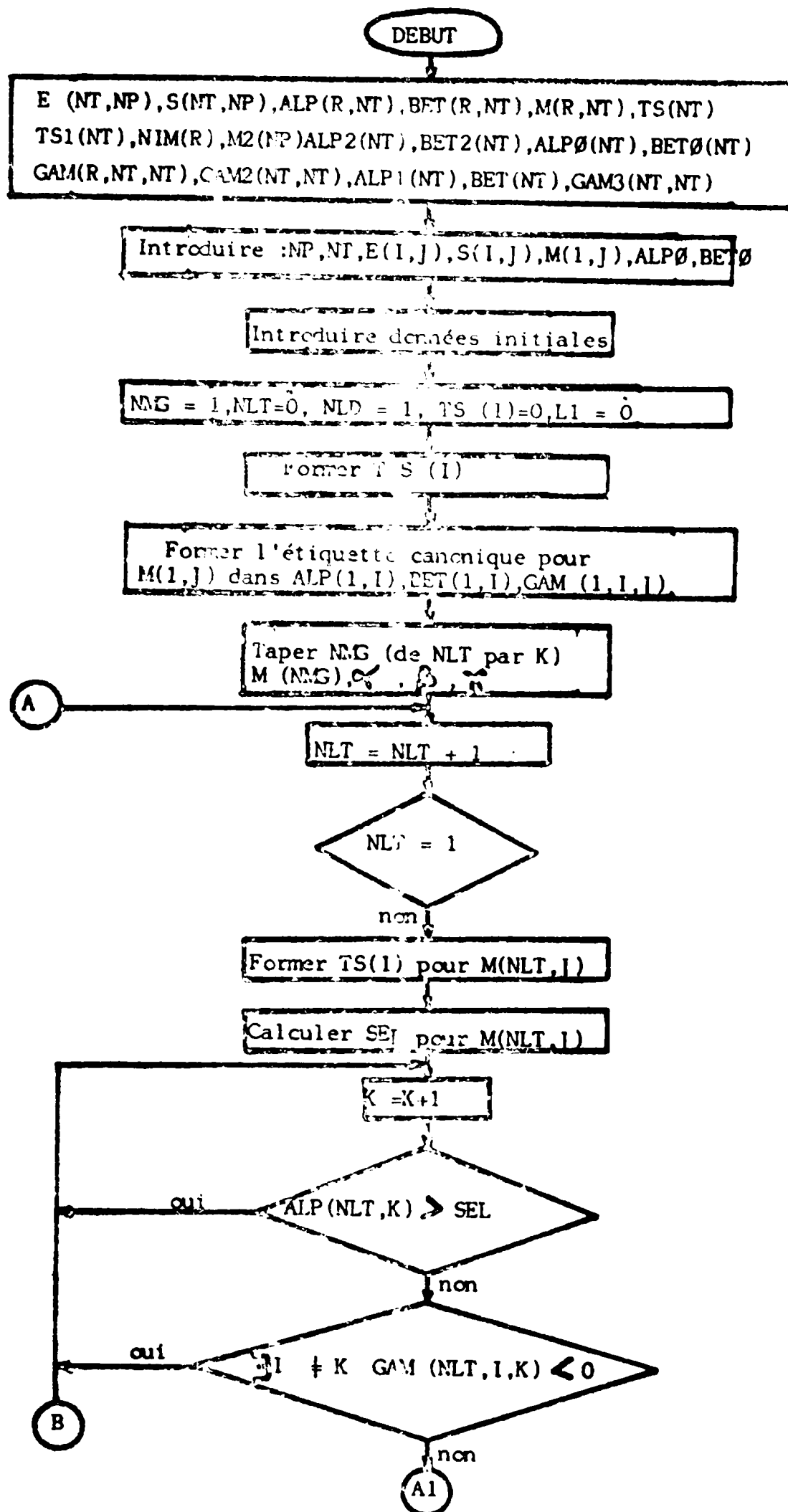


Fig. 5.2. - Algorithme de construction du graphe des classes d'états

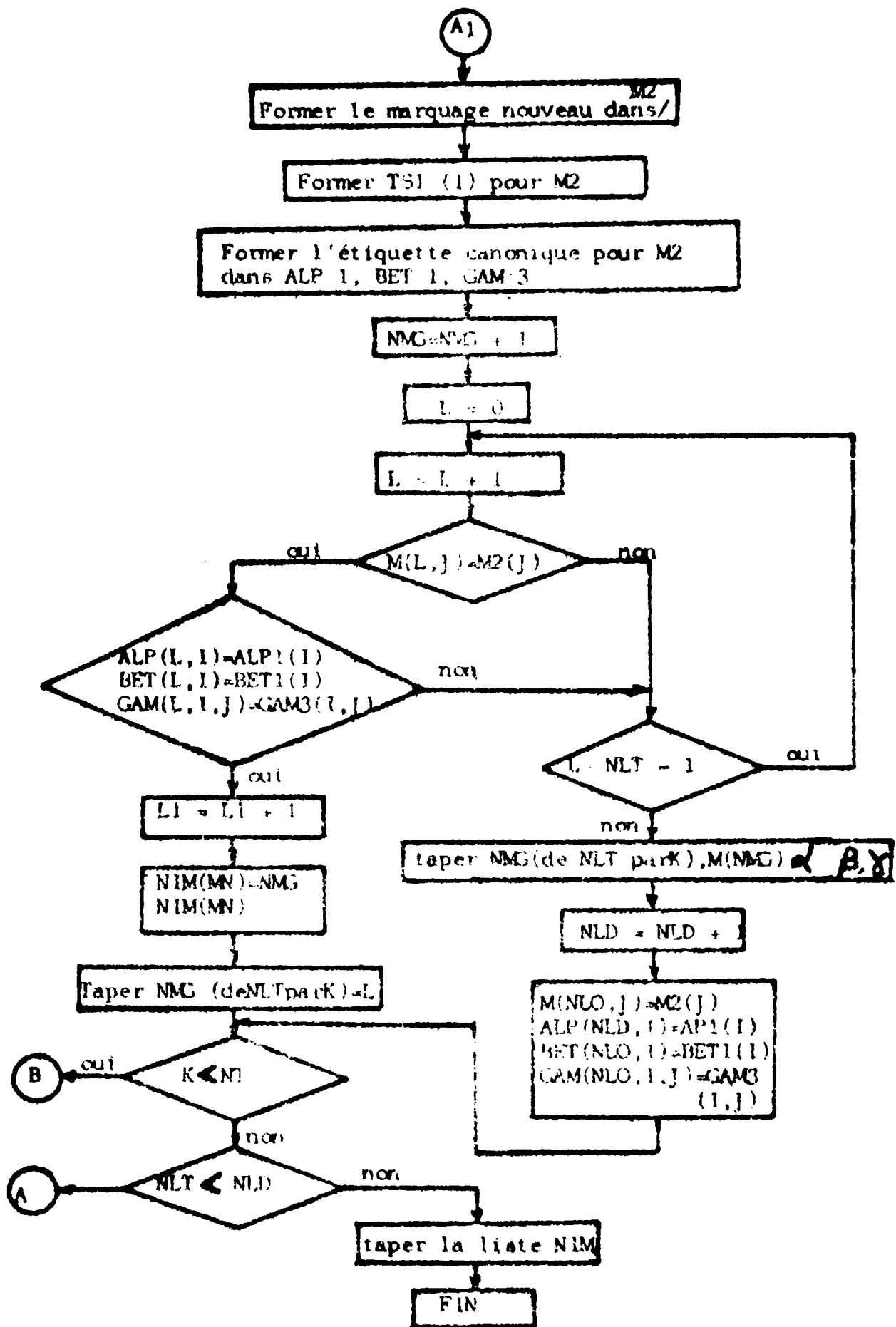


Fig. 5.2. (suite)



### V.3. - APPLICATION :

Le réseau RPT du module à étudier est obtenu en introduisant les étiquettes de temporisation des transitions du RP construit dans le chapitre II. Ces contraintes temporelles sont définies à partir du cahier des charges. Le réseau RPT ainsi obtenu est complexe à cause du nombre important de places et de transitions. Cette complexité est accrue par l'explosion du nombre des états  $(M_i, X_i)$  lors de l'analyse des RPT. L'étude du comportement du module dans le domaine temporel devient donc difficile. A cause de cette difficulté, il ne sera pas nécessaire de faire l'étude de tout le réseau RPT du module, mais de sélectionner un régime de fonctionnement particulier, relativement isolé, dont l'interprétation physique est assez claire. L'étude d'un tel problème nous donne la possibilité de résoudre plusieurs questions qui se posent pendant la phase de conception du module technologique. Dans le cadre d'une telle position du problème, on étudie la comparaison des performances temporelles en utilisant l'analyse des RPT de deux configurations du module à étudier, deux solutions sont proposées dans les paragraphes suivants. Celles-ci concernent le déplacement des pièces :

- 1ère solution : utilisation d'un seul robot "R"
- 2ème solution : utilisation de deux robots "R1" et "R2"

Pour évaluer la durée du régime de fonctionnement choisi, nous faisons les approximations suivantes :

- le temps de déplacement du robot (dans la zone de circulation qui lui est réservée) entre deux machines successives est le même.
- le temps de chargement ou déchargement est aussi identique.
- les contraintes temporelles des transitions qui représentent les opérations de traitement des machines  $(M_1, M_2, M_3, M_4)$  sont exprimées sous forme d'un intervalle de temps  $(D_{min}, D_{max})$ .

Les délais de toutes les opérations sont présentes sur le tableau suivant :

Tableau 5.1.

| OPERATION                  | DUREE   |
|----------------------------|---------|
| CHARGEMENT                 | (2,3)   |
| DECHARGEMENT               | (2,3)   |
| EXECUTION T.I OU T.III     | (80,85) |
| EXECUTION T.II             | (60,65) |
| EXECUTION C <sub>int</sub> | (63,65) |
| EXECUTION C <sub>fin</sub> | (40,42) |

} Cas d'un seul robot.

Nous donnons dans le tableau suivant les différents délais des opérations dans le cas d'un seul robot et de deux robots (durée des opérations qui varient lorsqu'on passe de la 1ère solution à la deuxième).

| OPERATION    | DUREE                   |                              |            |
|--------------|-------------------------|------------------------------|------------|
|              | Cas d'un seul robot "R" | Cas de deux robots R1 et R2. |            |
| DEPLACEMENT  | (16,17)                 | SE-M1-M2-M3 ST               | ST -M4 S S |
|              |                         | (16,17)                      | (4,5)      |
| CHARGEMENT   | (2,3)                   | (2,3)                        | (1,2)      |
| DECHARGEMENT | (2,3)                   | (2,3)                        | (1,2)      |

Tableau 5.2.

### V3.1. - ANALYSE DE LA SOLUTION AVEC UN SEUL ROBOT :

Dans le cas où l'opération de déplacement est assurée par un seul robot, nous aurons la situation suivante :

- les positions initiales et finales, des pièces à usiner sont présentées sur le tableau 5.3.

- l'algorithme de résolution du problème concernant l'ordre de transport (ordre de déplacement du robot) des pièces entre les différentes machines et le traitement approprié de chacune des pièces (4 pièces) est donné. Il est présenté sur la fig. 5.3.

Tableau 5.3.

| Pièces | Etat de la pièce | Position initial | Etat initial | Position final | Etat final            |
|--------|------------------|------------------|--------------|----------------|-----------------------|
| P1     |                  | M1               | Fin TIII     | M4             | Fin Cfin              |
| P2     |                  | M2               | fin TII      | M3             | fin Cint              |
| P3     |                  | M3               | fin Cint     | M1             | fin TIII              |
| P4     |                  | M4               | fin Cfin     | SS             | fin de toutes tâches. |

Etat du robot :

- position initiale près SS
- position finale près SS

Le réseau de Petri qui décrit le déroulement du processus dans le module dans le cadre du problème posé, est présenté sur la fig. 5.4. Ce réseau a été obtenu à partir du RP, réduit du module (fig. 4.15) en tenant compte de l'algorithme de fonctionnement de ce régime (fig. 5.3.) et des temporisations des différentes opérations (tableau 5.2.)

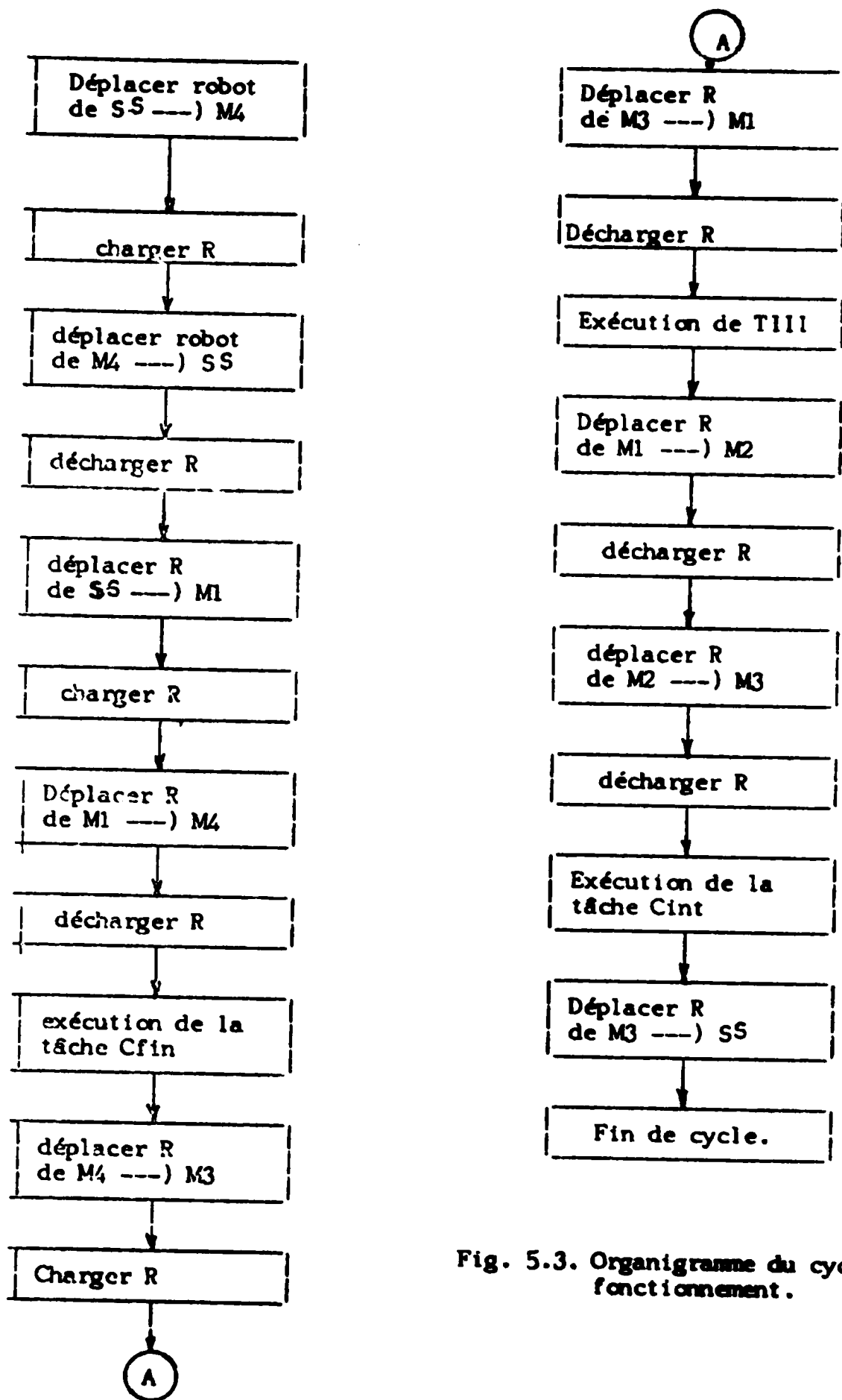


Fig. 5.3. Organigramme du cycle de fonctionnement.

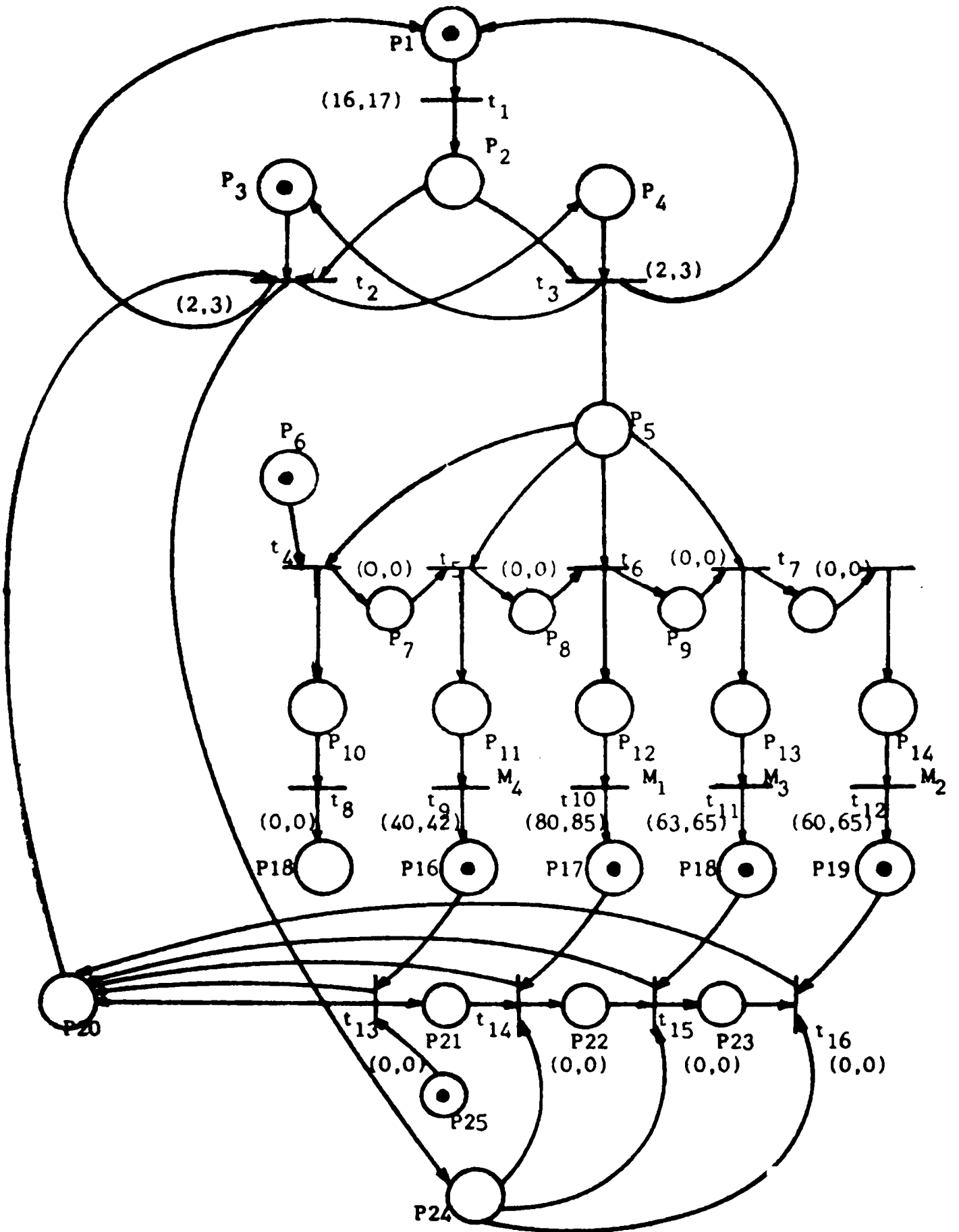


Fig. 5.4. - Réseau RPT du régime de fonctionnement choisi dans le cas d'un seul robot.

Le graphe des classes d'états est présenté sur la fig. 5.5. Il a été obtenu par l'utilisation de l'algorithme de construction des classes d'états présenté au paragraphe V.2. Les marquages résultants de l'application de cette méthode au réseau RPT du régime de fonctionnement choisi (fig. 5.4) sont décrits sur le tableau 5.4.

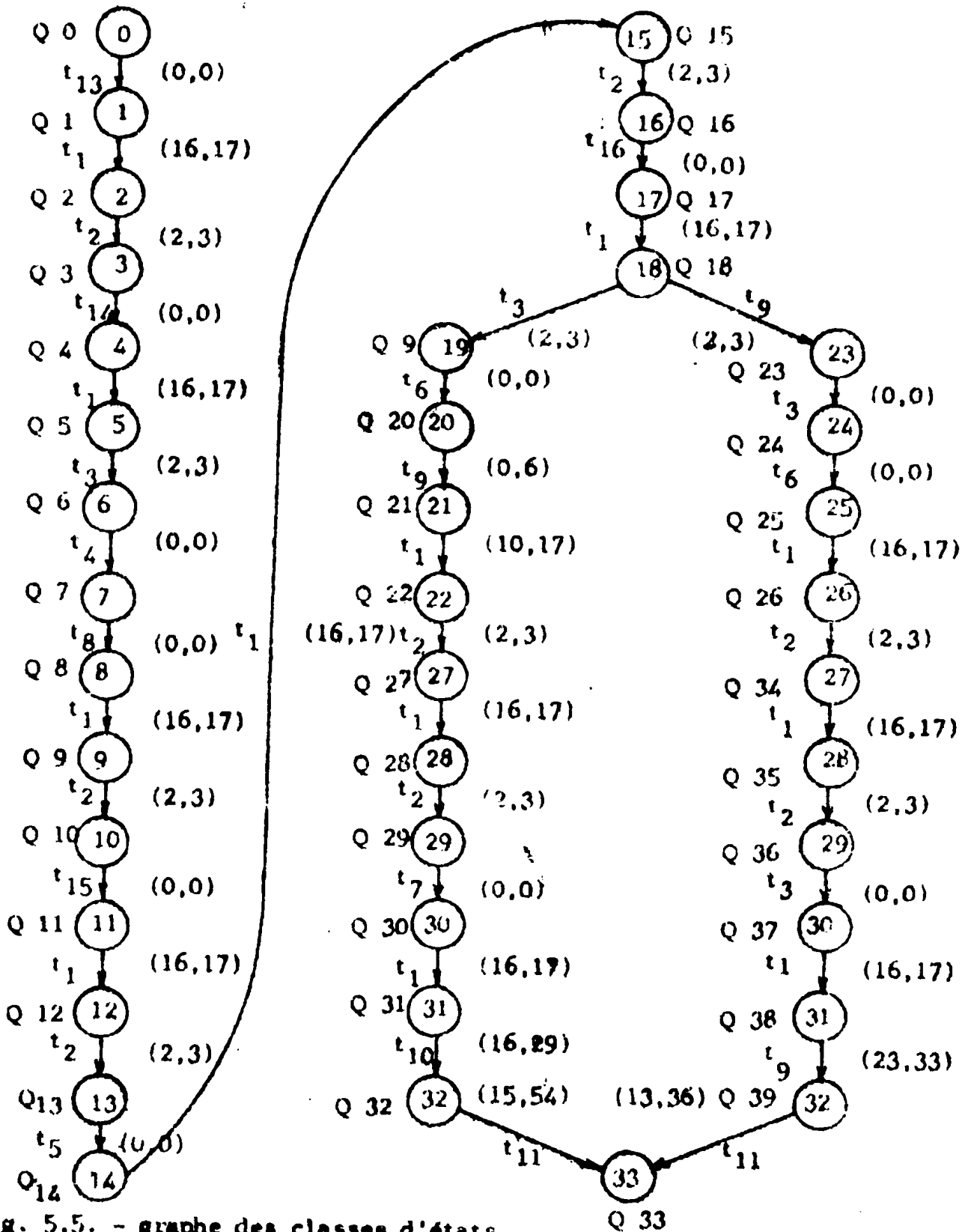


Fig. 5.5. - graphe des classes d'états.

|    | PLACES MARQUEES |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----|-----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|    | 1               | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
| 0  | 1               |   | 1 |   |   | 1 |   |   |   |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  | 1  | 1  |    |    |    |    |    | 1  |
| 1  | 1               |   | 1 |   |   | 1 |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |    |    |    |    |
| 2  |                 | 1 | 1 |   |   | 1 |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |    |    |    |    |
| 3  | 1               |   |   | 1 |   | 1 |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  | 1  |    | 1  |    |    |    | 1  |
| 4  | 1               |   |   | 1 |   | 1 |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  | 1  |    | 1  |    |    |    |
| 5  |                 | 1 |   | 1 |   | 1 |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  | 1  |    | 1  |    |    |    |
| 6  | 1               |   | 1 |   | 1 | 1 |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  | 1  |    | 1  |    |    |    |
| 7  | 1               |   | 1 |   |   |   |   | 1 |   |    | 1  |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  | 1  |    | 1  |    |    |    |
| 8  | 1               |   | 1 |   |   |   |   | 1 |   |    |    |    |    |    | 1  |    |    | 1  | 1  | 1  |    | 1  |    |    |    |
| 9  |                 | 1 | 1 |   |   |   |   | 1 |   |    |    |    |    |    | 1  |    |    | 1  | 1  | 1  |    | 1  |    |    |    |
| 10 | 1               |   |   | 1 |   |   |   | 1 |   |    |    |    |    |    | 1  |    |    | 1  | 1  |    |    | 1  |    |    | 1  |
| 11 | 1               |   |   | 1 |   |   |   | 1 |   |    |    |    |    |    | 1  |    |    | 1  | 1  |    |    |    | 1  |    |    |
| 12 |                 | 1 |   | 1 |   |   |   | 1 |   |    |    |    |    |    | 1  |    |    | 1  | 1  |    |    |    | 1  |    |    |
| 13 | 1               |   | 1 |   | 1 |   |   | 1 |   |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    |    | 1  |    |    |
| 14 | 1               |   | 1 |   |   |   |   | 1 |   |    | 1  |    |    |    | 1  |    |    | 1  | 1  |    |    |    | 1  |    |    |
| 15 |                 | 1 | 1 |   |   |   |   | 1 |   |    | 1  |    |    |    | 1  |    |    | 1  | 1  |    |    |    | 1  |    |    |
| 16 | 1               |   |   | 1 |   |   |   | 1 |   |    | 1  |    |    |    | 1  |    |    | 1  |    |    |    |    | 1  | 1  |    |
| 17 | 1               |   |   | 1 |   |   |   | 1 |   |    | 1  |    |    |    | 1  |    |    |    | 1  |    |    |    |    |    |    |
| 18 |                 | 1 |   | 1 |   |   |   | 1 |   |    | 1  |    |    |    | 1  |    |    |    | 1  |    |    |    |    |    |    |
| 19 | 1               |   | 1 |   | 1 |   |   | 1 |   |    | 1  |    |    |    | 1  |    |    |    | 1  |    |    |    |    |    |    |
| 20 | 1               |   | 1 |   |   |   |   |   | 1 |    |    | 1  |    |    | 1  |    |    |    | 1  |    |    | 1  |    |    |    |
| 21 | 1               |   | 1 |   |   |   |   |   | 1 |    |    | 1  |    |    | 1  | 1  |    |    |    | 1  |    |    |    |    |    |
| 22 |                 | 1 | 1 |   |   |   |   |   | 1 |    |    | 1  |    |    | 1  | 1  |    |    |    | 1  |    |    |    |    |    |
| 23 |                 | 1 |   | 1 |   |   |   | 1 | 1 |    |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    |    | 1  |    |    |    |    |    |
| 24 | 1               |   | 1 |   | 1 |   |   | 1 |   |    |    |    |    |    | 1  | 1  |    |    |    | 1  |    |    |    |    |    |
| 25 | 1               |   | 1 |   |   |   |   |   | 1 |    |    | 1  |    |    | 1  | 1  |    |    |    | 1  |    |    |    |    |    |
| 26 |                 | 1 | 1 |   |   |   |   |   | 1 |    |    | 1  |    |    | 1  | 1  |    |    |    | 1  |    |    |    |    |    |
| 27 | 1               |   |   | 1 |   |   |   |   | 1 |    |    | 1  |    |    | 1  | 1  |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  |
| 28 |                 | 1 |   | 1 |   |   |   |   | 1 |    |    | 1  |    |    | 1  | 1  |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  |
| 29 | 1               |   | 1 |   | 1 |   |   |   | 1 |    |    | 1  |    |    | 1  | 1  |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  |
| 30 | 1               |   | 1 |   |   |   |   |   |   |    |    | 1  |    |    | 1  | 1  |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  |
| 31 |                 | 1 | 1 |   |   |   |   |   |   |    |    | 1  |    |    | 1  | 1  |    |    |    |    |    |    |    |    | 1  |
| 32 |                 | 1 | 1 |   |   |   |   |   |   |    |    |    | 1  |    | 1  | 1  | 1  |    |    |    |    |    |    |    | 1  |
| 33 |                 | 1 | 1 |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    | 1  | 1  | 1  | 1  |    |    |    |    |    |    | 1  |

Tableau 5.4.

En utilisant la méthode de construction du graphe d'état présenté au paragraphe V.2., on obtient les caractéristiques temporelles de chaque classe d'état :

|   |   |  |  |  |  |
|---|---|--|--|--|--|
| <u>Etat Q0</u><br>0 < t1 < 0<br>16 < t1 < 17                      | <u>Etat Q1</u><br>16 < t1 < 17                              | <u>Etat Q2</u><br>2 < t2 < 3                                   | <u>Etat Q3</u><br>16 < t1 < 17<br>0 < t14 < 0    | <u>Etat Q4</u><br>16 < t1 < 17                                 | <u>Etat Q5</u><br>2 < t3 < 3                                   |
| <u>Etat Q6</u><br>0 < t4 < 0<br>16 < t1 < 17                      | <u>Etat Q7</u><br>16 < t1 < 17<br>0 < t8 < 0                | <u>Etat Q8</u><br>16 < t1 < 17                                 | <u>Etat Q9</u><br>2 < t2 < 3                     | <u>Etat Q10</u><br>16 < t1 < 17<br>0 < t15 < 0                 | <u>Etat Q11</u><br>16 < t1 < 17                                |
| <u>Etat Q12</u><br>2 < t3 < 3                                     | <u>Etat Q13</u><br>16 < t1 < 17<br>0 < t5 < 0               | <u>Etat Q14</u><br>16 < t1 < 17<br>40 < t9 < 42                | <u>Etat Q15</u><br>2 < t2 < 3<br>23 < t9 < 26    | <u>Etat Q16</u><br>16 < t1 < 17<br>0 < t16 < 0<br>20 < t9 < 24 | <u>Etat Q17</u><br>16 < t1 < 17<br>20 < t9 < 24                |
| <u>Etat Q18</u><br>3 < t9 < 8<br>2 < t3 < 3                       | <u>Etat Q19</u><br>16 < t1 < 17<br>0 < t6 < 0<br>0 < t9 < 6 | <u>Etat Q20</u><br>16 < t1 < 17<br>0 < t9 < 6<br>80 < t10 < 85 | <u>Etat Q21</u><br>10 < t1 < 17<br>74 < t10 < 85 | <u>Etat Q22</u><br>2 < t2 < 3<br>57 < t10 < 65                 | <u>Etat Q23</u><br>0 < t3 < 0                                  |
| <u>Etat Q24</u><br>16 < t1 < 17<br>0 < t6 < 0                     | <u>Etat Q25</u><br>16 < t1 < 17<br>80 < t10 < 85            | <u>Etat Q26</u><br>2 < t2 < 3<br>63 < t10 < 69                 | <u>Etat Q27</u><br>54 < t10 < 63<br>16 < t1 < 17 | <u>Etat 28</u><br>37 < t10 < 47<br>2 < t3 < 3                  | <u>Etat Q29</u><br>34 < t10 < 45<br>0 < t7 < 0<br>16 < t1 < 17 |
| <u>Etat Q30</u><br>16 < t1 < 17<br>34 < t10 < 45<br>63 < t11 < 69 | <u>Etat Q31</u><br>19 < t10 < 29<br>46 < t11 < 73           | <u>Etat Q32</u><br>15 < t11 < 54                               | <u>Etat Q34</u><br>60 < t10 < 67<br>16 < t1 < 17 | <u>Etat Q35</u><br>43 < t10 < 51<br>2 < t3 < 3                 | <u>Etat Q36</u><br>40 < t10 < 49<br>0 < t1 < 0<br>16 < t1 < 17 |
| <u>Etat Q37</u><br>16 < t1 < 17<br>40 < t10 < 49<br>63 < t11 < 65 | <u>Etat Q38</u><br>23 < t10 < 33<br>46 < t11 < 49           | <u>Etat Q39</u><br>13 < t11 < 26                               |  |  |  |



L'état Q<sub>0</sub> décrit l'état initial, l'état Q<sub>33</sub> est interprété comme étant l'état final du régime choisi. Le temps de passage T (0,33) de l'état Q<sub>0</sub> à l'état Q<sub>33</sub> estimé par les formules (5.1) et (5.2) est :

$$T_{\min}(0,33) = 174$$

$$T_{\max}(0,33) = 241$$

L'estimation finale de la solution "un robot" a la forme suivante :

$$174 \leq T(0,33) \leq 241$$

### V.3.2. - ANALYSE DE LA SOLUTION AVEC DEUX ROBOTS R1 et R2 :

L'utilisation de deux robots R1 et R2 pour le déplacement des pièces entre les différents composants du module entraîne une modification de la structure technologique de celui-ci (fig. 5.6). Le changement opéré, par rapport à la structure dans le cas d'un seul robot, est l'introduction d'un stock tampon entre la machine M3 et le stock S1. La zone de déplacement est partagée en deux zones de circulation des robots R1 et R2.

Le rôle du stock tampon est de pourvoir en pièces la machine M4 et d'éviter ainsi un blocage éventuel. On étudie le cas où le stock tampon ne peut recevoir plus d'une pièce (N = 1). La structure physique ainsi modifiée avec l'introduction d'un deuxième robot par rapport à la précédente est représentée sur la fig. 5.7.

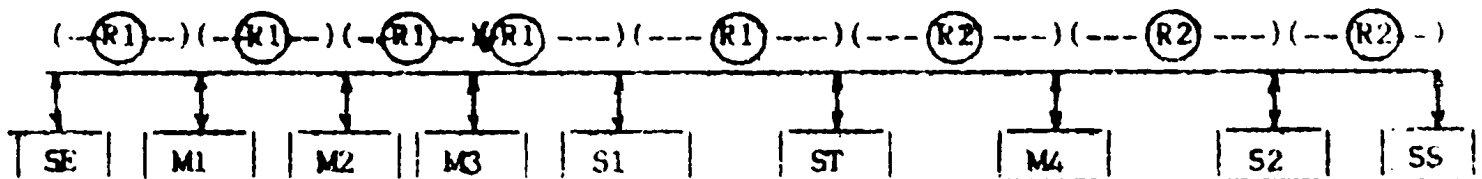


Fig. 5.6. - Structure physique du module technologique utilisant deux robots R1 et R2.

La zone de déplacement des robots R1 et R2 est partagée en deux parties (voir Fig. 5.6.).

- 1ère zone - SE - M1 - M3 - S1 - ST (pour le robot R1)
- 2ème zone : ST - M4 - S2 - S5 (pour le robot R2)

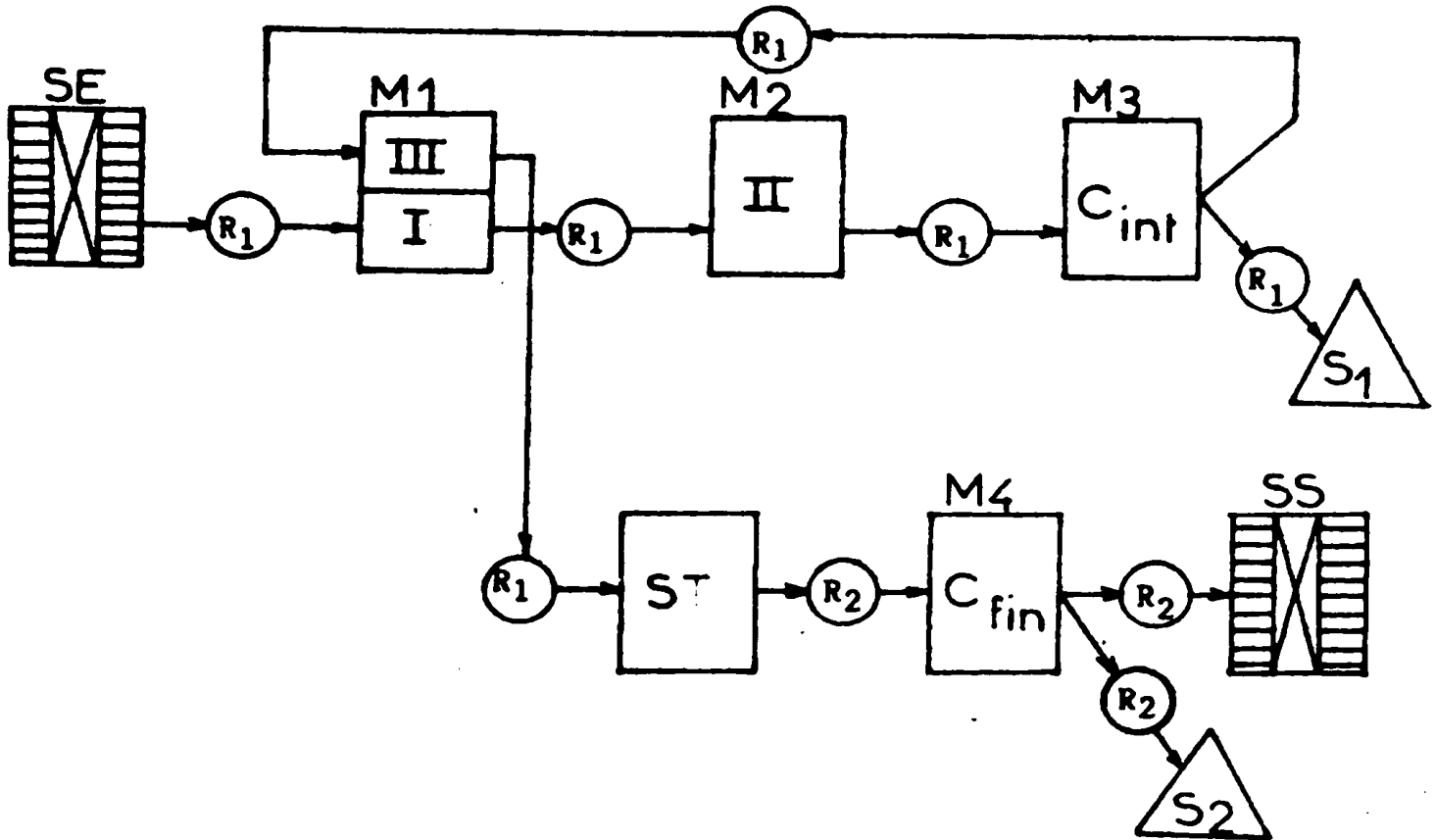


Fig. 5.7 - Structure technologique du module utilisant deux robots  $R_1$  et  $R_2$ .

L'introduction d'un stock tampon aura pour conséquence de modifier le logiciel de commande de l'opération de déplacement. On aura deux logiciels de commande, (fig. 5.8 et fig. 5.9) concernant cette opération synchronisant chacun les déplacements des robots  $R_1$  et  $R_2$ . Un conflit apparaîtra lors du déplacement simultané des deux robots  $R_1$  et  $R_2$  vers la machines "stock tampon" pour effectuer soit l'opération chargement, soit l'opération déchargement. Ce conflit sera résolu au niveau du logiciel de décision.

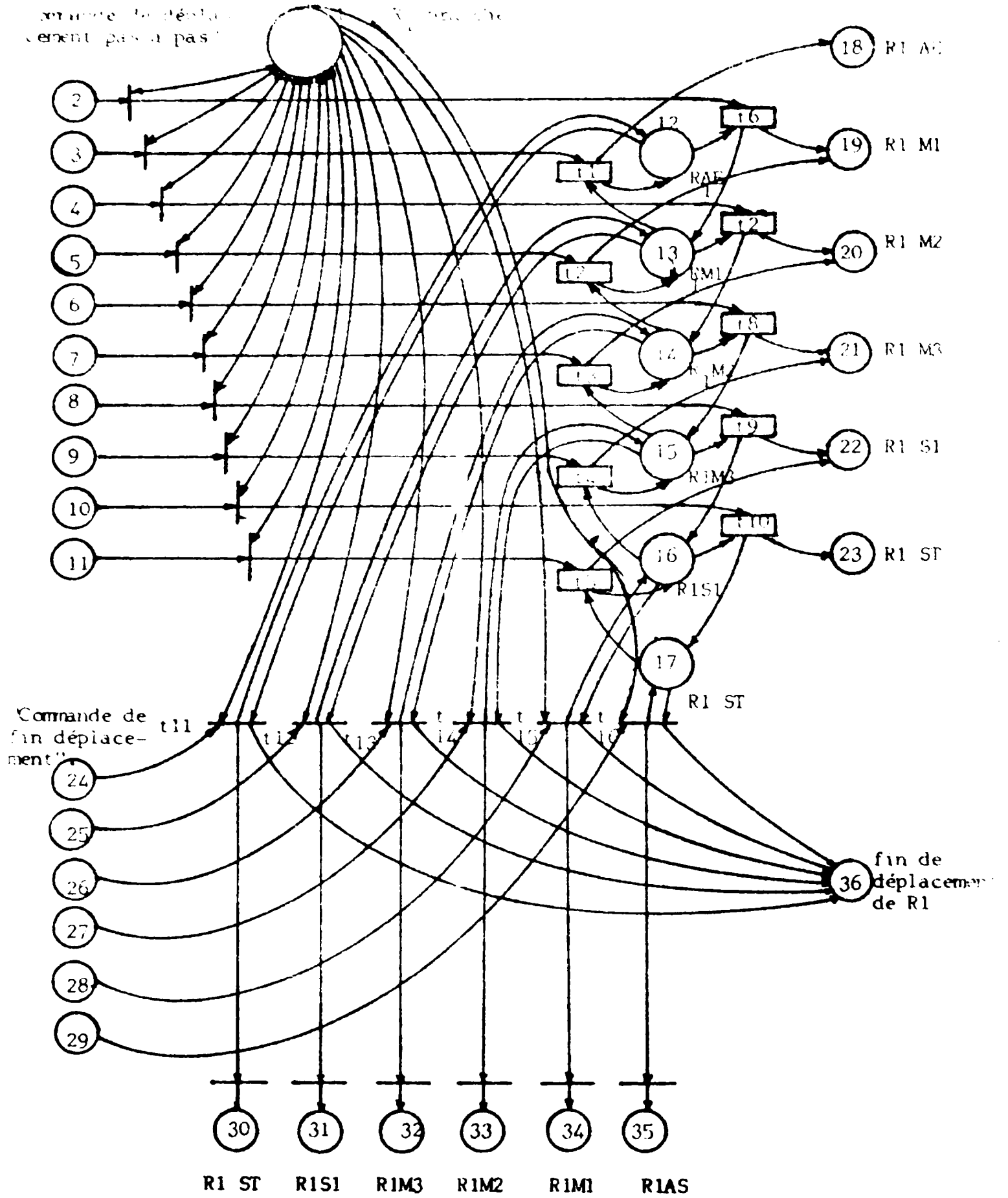


Fig. 5.8 - Réseau RP de l'opération déplacement du robot R1.

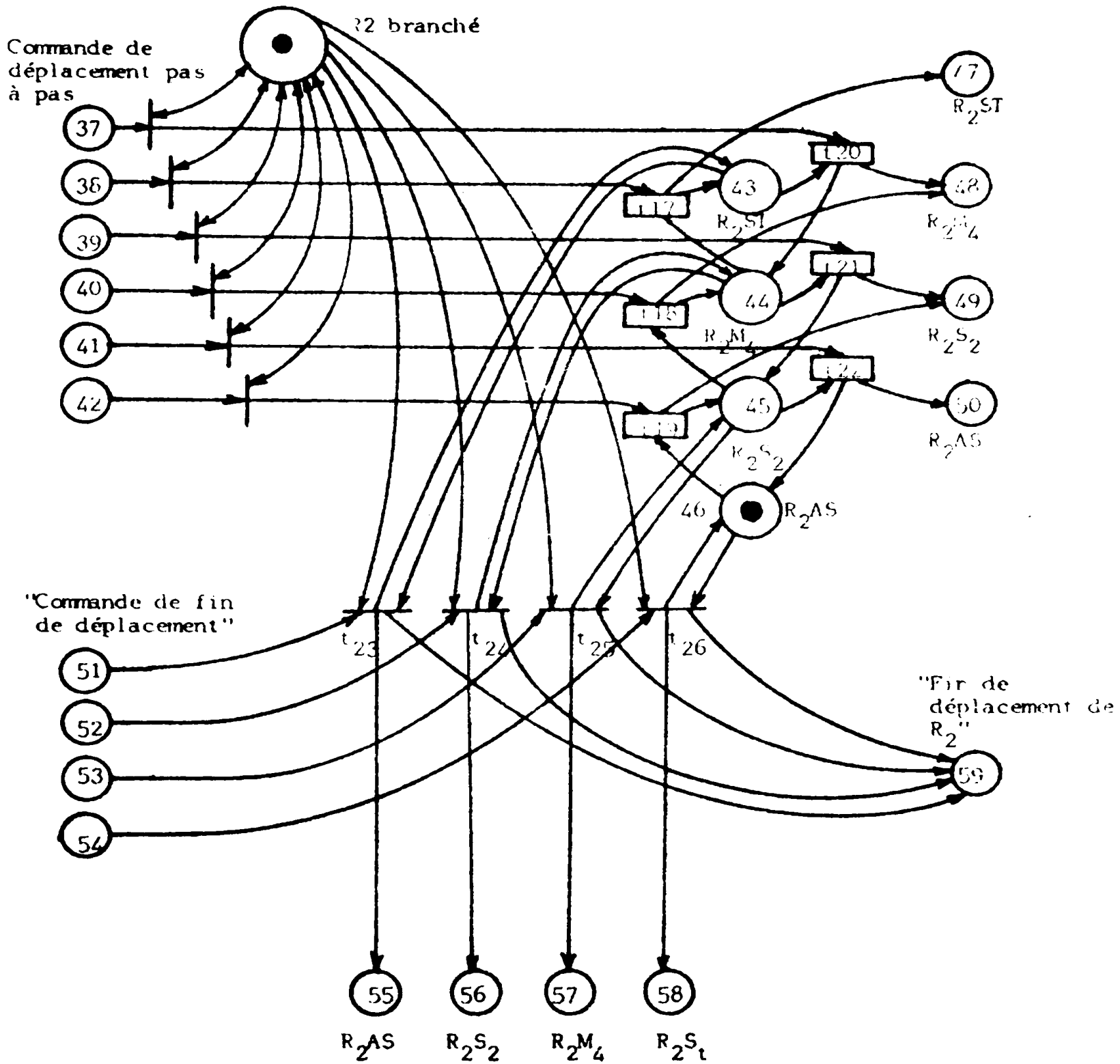


Fig. 5.9 - Réseau RP de l'opération de déplacement du robot  $R_2$ .

Position du problème :

Dans le cas où l'opération de déplacement est assurée par deux robots R1 et R2, le problème posé a la situation suivante.

- les positions initiales et finales (des pièces à usiner) sont les mêmes que pour le cas d'un seul robot et sont présentées sur le tableau 5.5.
- l'algorithme de résolution de ce problème particulier est présenté sur la fig. 5.10.

- Etat des robots.

Tableau 5.5.

|                   | R1      | R2      |
|-------------------|---------|---------|
| Position initiale | près SE | près SS |
| Position finale   | près M3 | près M4 |

Le réseau RPT décrivant le fonctionnement du régime choisi est présenté sur la fig. 5.11. Ce réseau RPT est obtenu à partir du réseau RP du module à étudier (chapitre V) auquel on a introduit d'une part les temporisations aux transitions qui expriment la durée de traitement des opérations et d'autre part un logiciel de décision traduisant les aspirations de l'algorithme de fonctionnement du processus particulier (fig. 5.11).

L'analyse de ce réseau RPT selon la méthode énumérative (paragraphe V.2.) des classes d'états nous permet d'obtenir :

- le graphe de classes d'états (fig. 5.12)
- les marquages accessibles (tableau 5.6).

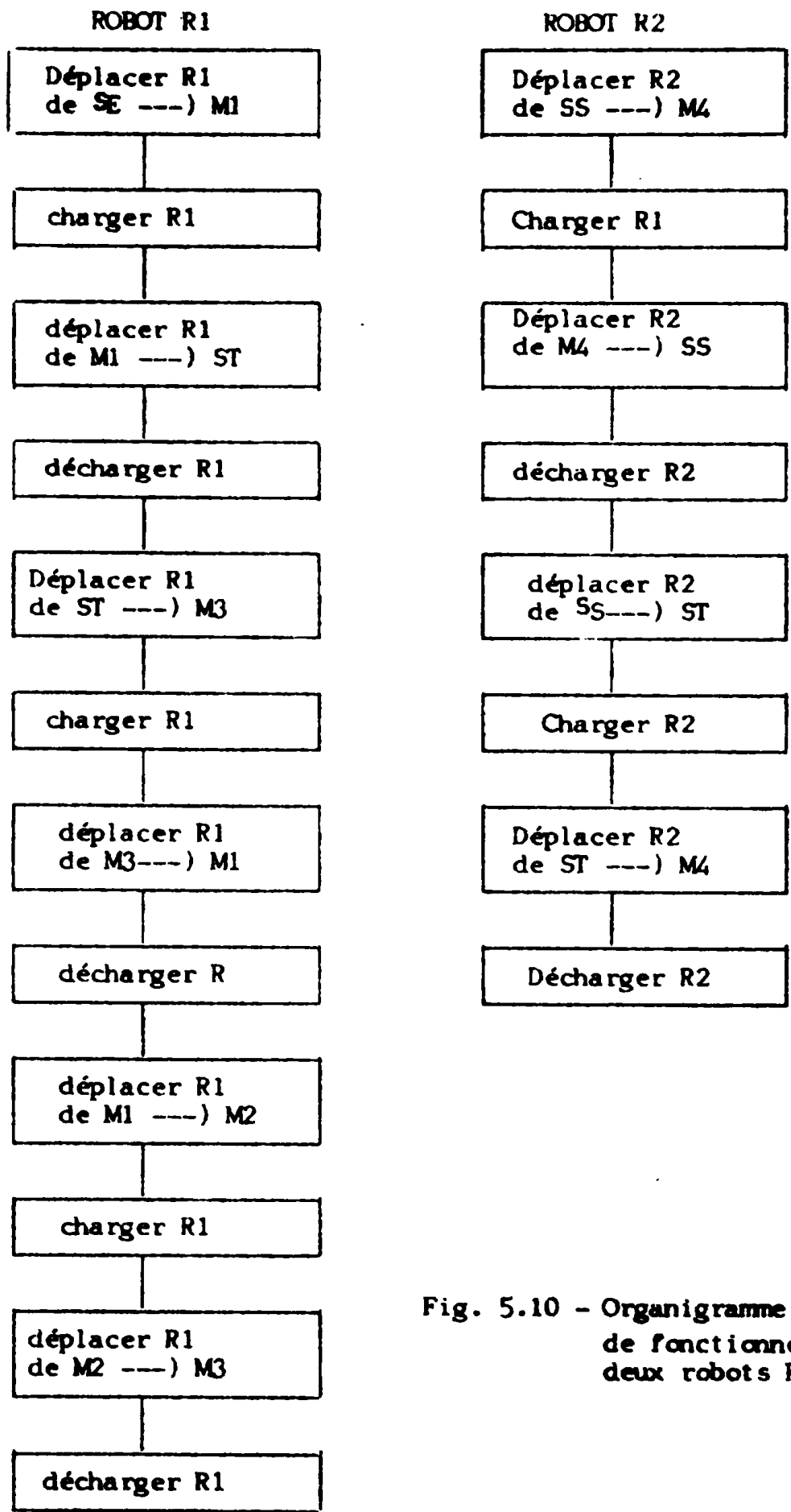


Fig. 5.10 - Organigramme de l'algorithme de fonctionnement utilisant deux robots R1 et R2.

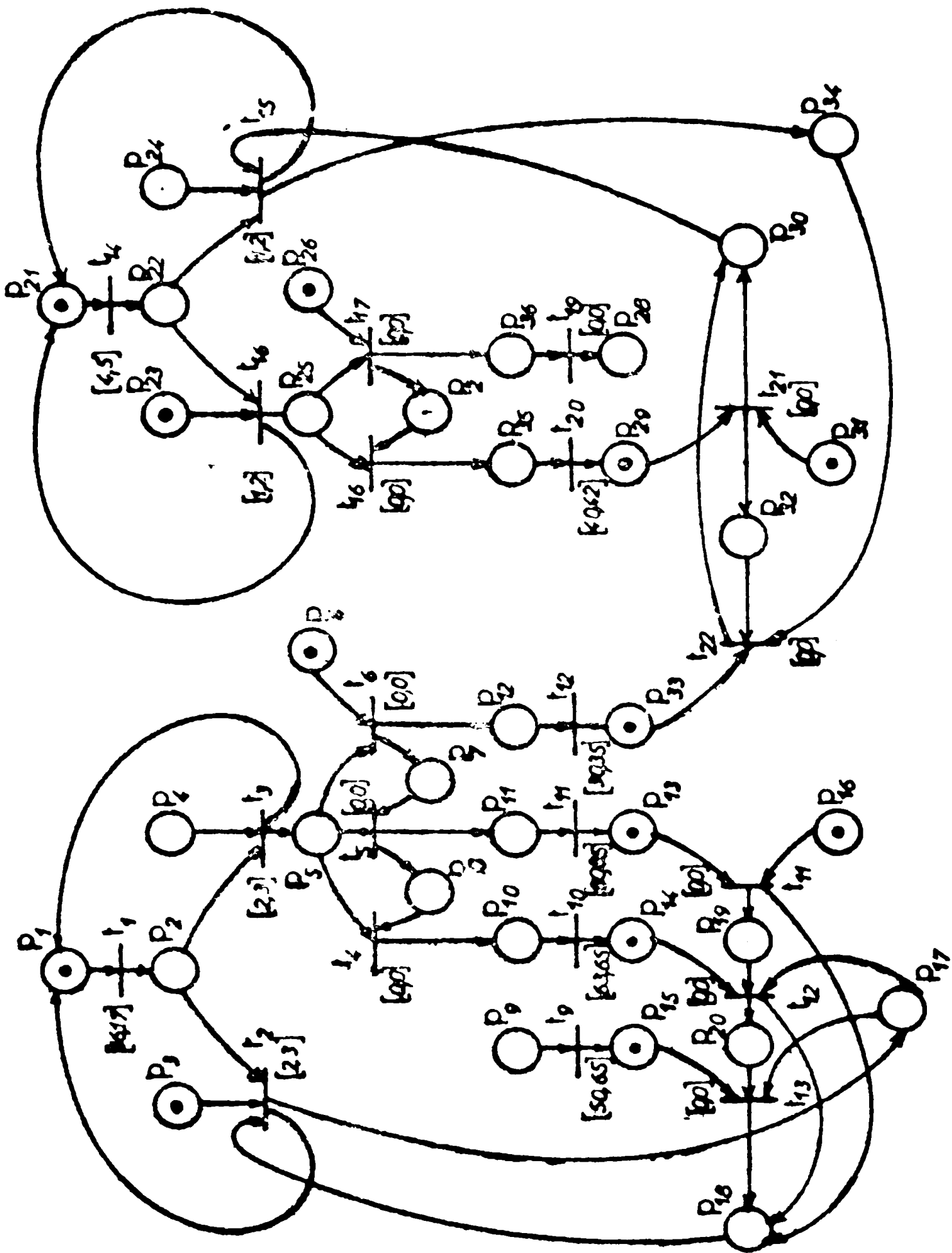


Fig. 5.11 - Réseau RPT du régime particulier (cas de deux robots P1 - P2)

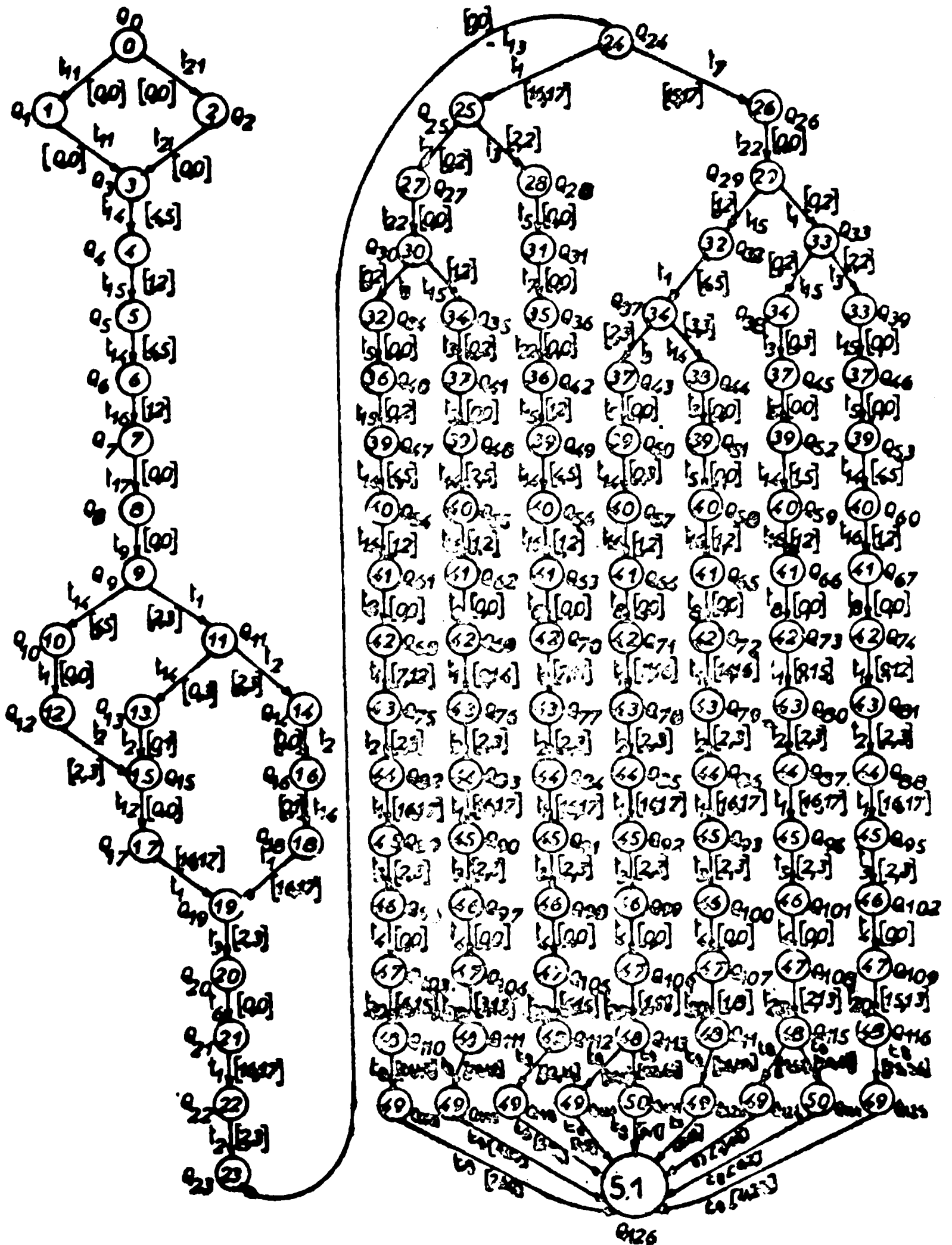


Fig. 5.12 - Graphe des classes d'états



L'ensemble des différents états obtenus est présenté dans le tableau

suivant :

| <u>Etat Q0</u>                              | <u>Etat Q1</u>                              | <u>Etat Q2</u>                              | <u>Etat Q3</u>                              | <u>Etat Q4</u>                              | <u>Etat Q5</u>                              | <u>Etat Q6</u>                              |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 16 < T1 < 17<br>4 < T14 < 5<br>0 < T11 < 0  | 16 < T1 < 17<br>4 < T14 < 5<br>0 < T21 < 0  | 16 < T1 < 17<br>4 < T14 < 5<br>0 < T11 < 0  | 16 < T1 < 17<br>4 < T14 < 5                 | 11 < T1 < 13<br>1 < T15 < 2                 | 9 < T1 < 12<br>4 < T14 < 5                  | 4 < T1 < 8<br>1 < T16 < 2                   |
| <u>Etat Q7</u>                              | <u>Etat Q8</u>                              | <u>Etat Q9</u>                              | <u>Etat Q10</u>                             | <u>Etat Q11</u>                             | <u>Etat Q12</u>                             | <u>Etat Q13</u>                             |
| 2 < T1 < 7<br>4 < T14 < 5<br>0 < T17 < 0    | 2 < T1 < 7<br>4 < T14 < 5<br>0 < T9 < 0     | 2 < T1 < 7<br>4 < T14 < 5                   | 0 < T1 < 3                                  | 0 < T14 < 3<br>2 < T2 < 3                   | 2 < T2 < 3                                  | 0 < T2 < 1                                  |
| <u>Etat Q14</u>                             | <u>Etat Q15</u>                             | <u>Etat Q16</u>                             | <u>Etat Q17</u>                             | <u>Etat Q18</u>                             | <u>Etat Q19</u>                             | <u>Etat Q20</u>                             |
| 0 < T14 < 1<br>16 < T1 < 17<br>0 < T12 < 0  | 16 < T1 < 17<br>0 < T2 < 0                  | 0 < T14 < 1<br>16 < T1 < 17                 | 16 < T1 < 17                                | 15 < T1 < 17                                | 2 < T3 < 3                                  | 16 < T1 < 17<br>0 < T6 < 0                  |
| <u>Etat Q21</u>                             | <u>Etat Q22</u>                             | <u>Etat Q23</u>                             | <u>Etat Q24</u>                             | <u>Etat Q25</u>                             | <u>Etat Q26</u>                             | <u>Etat Q27</u>                             |
| 16 < T1 < 17<br>35 < T7 < 35                | 18 < T7 < 20<br>2 < T2 < 3                  | 15 < T7 < 18<br>16 < T1 < 17<br>0 < T13 < 0 | 15 < T7 < 18<br>16 < T1 < 17                | 0 < T7 < 2<br>2 < T3 < 3                    | 0 < T1 < 2<br>0 < T2 < 0                    | 0 < T3 < 3<br>0 < T22 < 0                   |
| <u>Etat Q28</u>                             | <u>Etat Q29</u>                             | <u>Etat Q30</u>                             | <u>Etat Q31</u>                             | <u>Etat Q32</u>                             | <u>Etat Q33</u>                             | <u>Etat Q34</u>                             |
| 16 < T1 < 17<br>0 < T5 < 0<br>0 < T7 < 0    | 0 < T1 < 2<br>1 < T15 < 2                   | 0 < T3 < 3<br>1 < T15 < 2                   | 16 < T1 < 17<br>0 < T7 < 0<br>0 < T8 < 85   | 0 < T1 < 1<br>4 < T14 < 5                   | 0 < T15 < 2<br>2 < T13 < 3                  | 0 < T15 < 2<br>16 < T1 < 17<br>0 < T5 < 0   |
| <u>Etat 35</u>                              | <u>Etat Q36</u>                             | <u>Etat Q37</u>                             | <u>Etat Q38</u>                             | <u>Etat Q39</u>                             | <u>Etat Q40</u>                             | <u>Etat Q41</u>                             |
| 0 < T3 < 2<br>4 < T14 < 5                   | 0 < T22 < 0<br>16 < T1 < 17<br>80 < T8 < 85 | 2 < T3 < 3<br>3 < T14 < 5                   | 0 < T3 < 3<br>4 < T14 < 5                   | 0 < T15 < 0<br>16 < T1 < 17<br>0 < T5 < 0   | 16 < T1 < 17<br>0 < T15 < 2<br>80 < T8 < 85 | 2 < T14 < 5<br>16 < T1 < 17<br>0 < T5 < 0   |
| <u>Etat Q42</u>                             | <u>Etat Q43</u>                             | <u>Etat Q44</u>                             | <u>Etat Q45</u>                             | <u>Etat Q46</u>                             | <u>Etat Q47</u>                             | <u>Etat Q48</u>                             |
| 16 < T1 < 17<br>80 < T8 < 85<br>1 < T15 < 2 | 0 < T14 < 3<br>16 < T1 < 17<br>0 < T5 < 0   | 0 < T14 < 0<br>1 < T16 < 2                  | 1 < T14 < 5<br>16 < T1 < 17<br>0 < T5 < 0   | 16 < T1 < 17<br>0 < T5 < 0<br>4 < T14 < 5   | 14 < T1 < 17<br>78 < T8 < 85<br>4 < T14 < 5 | 2 < T14 < 5<br>16 < T1 < 17<br>80 < T8 < 85 |
| <u>Etat Q49</u>                             | <u>Etat Q50</u>                             | <u>Etat Q51</u>                             | <u>Etat Q52</u>                             | <u>Etat Q53</u>                             | <u>Etat Q54</u>                             | <u>Etat Q55</u>                             |
| 14 < T1 < 16<br>78 < T8 < 84<br>4 < T14 < 5 | 0 < T14 < 3<br>16 < T1 < 17<br>80 < T8 < 85 | 1 < T16 < 2<br>0 < T5 < 0<br>16 < T1 < 17   | 1 < T14 < 5<br>16 < T1 < 17<br>80 < T8 < 85 | 16 < T1 < 17<br>4 < T14 < 5<br>80 < T8 < 85 | 9 < T1 < 13<br>73 < T8 < 81<br>1 < T16 < 2  | 11 < T1 < 15<br>75 < T8 < 82<br>1 < T16 < 2 |

|   |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|---|
| <u>Etat Q56</u>                               | <u>Etat Q57</u>                               | <u>Etat Q58</u>                               | <u>Etat Q59</u>                               | <u>Etat Q60</u>                               | <u>Etat Q61</u>                               | <u>Etat Q62</u>                               |
| 9 < T1 < 12<br>73 < T8 < 80<br>1 < T16 < 2    | 13 < T1 < 17<br>77 < T8 < 85<br>1 < T16 < 2   | 1 < T16 < 2<br>16 < T1 < 17<br>80 < T8 < 85   | 11 < T1 < 16<br>75 < T8 < 84<br>1 < T16 < 2   | 11 < T1 < 13<br>75 < T8 < 81<br>1 < T16 < 2   | 7 < T1 < 12<br>71 < T8 < 80<br>0 < T18 < 0    | 9 < T1 < 14<br>73 < T8 < 81<br>0 < T18 < 0    |
| <u>Etat 63</u>                                | <u>Etat Q64</u>                               | <u>Etat Q65</u>                               | <u>Etat Q66</u>                               | <u>Etat Q67</u>                               | <u>Etat Q68</u>                               | <u>Etat Q69</u>                               |
| 7 < T1 < 11<br>71 < T8 < 79<br>0 < T8 < 0     | 11 < T1 < 16<br>75 < T8 < 84<br>0 < T18 < 0   | 14 < T1 < 16<br>78 < T8 < 89<br>0 < T18 < 0   | 9 < T1 < 15<br>73 < T8 < 83<br>0 < T18 < 0    | 9 < T1 < 12<br>73 < T8 < 80<br>0 < T18 < 0    | 7 < T1 < 12<br>0 < T8 < 0<br>40 < T20 < 42    | 9 < T1 < 14<br>73 < T8 < 81<br>40 < T20 < 42  |
| <u>Etat Q 70</u>                              | <u>Etat Q71</u>                               | <u>Etat Q72</u>                               | <u>Etat Q73</u>                               | <u>Etat Q74</u>                               | <u>Etat Q75</u>                               | <u>Etat Q76</u>                               |
| 7 < T1 < 1<br>71 < T8 < 79<br>40 < T20 < 42   | 11 < T1 < 16<br>75 < T8 < 85<br>40 < T20 < 42 | 14 < T1 < 16<br>78 < T8 < 84<br>40 < T20 < 42 | 9 < T1 < 15<br>73 < T8 < 83<br>40 < T20 < 42  | 9 < T1 < 12<br>73 < T8 < 80<br>40 < T20 < 42  | 59 < T8 < 73<br>23 < T20 < 35<br>2 < T2 < 3   | 59 < T8 < 72<br>26 < T20 < 33<br>2 < T2 < 3   |
| <u>Etat Q77</u>                               | <u>Etat Q78</u>                               | <u>Etat Q79</u>                               | <u>Etat Q80</u>                               | <u>Etat Q81</u>                               | <u>Etat Q82</u>                               | <u>Etat Q83</u>                               |
| 60 < T8 < 72<br>29 < T20 < 33<br>2 < T2 < 3   | 59 < T8 < 74<br>24 < T20 < 31<br>2 < T2 < 3   | 62 < T8 < 70<br>24 < T20 < 28<br>2 < T2 < 3   | 58 < T8 < 74<br>25 < T20 < 33<br>2 < T2 < 9   | 61 < T8 < 71<br>28 T20 < 33<br>2 < T2 < 3     | 56 < T8 < 71<br>20 < T20 < 33<br>16 < T1 < 17 | 56 < T8 < 70<br>23 < T20 < 30<br>16 < T1 < 17 |
| <u>Etat Q84</u>                               | <u>Etat Q85</u>                               | <u>Etat Q86</u>                               | <u>Etat Q87</u>                               | <u>Etat Q88</u>                               | <u>Etat Q89</u>                               | <u>Etat Q90</u>                               |
| 57 < T8 < 70<br>26 < T20 < 33<br>16 < T1 < 12 | 56 < T8 < 72<br>21 < T20 < 29<br>16 < T1 < 17 | 59 < T8 < 68<br>21 < T20 < 26<br>16 < T1 < 17 | 55 < T8 < 72<br>22 < T20 < 31<br>16 < T1 < 17 | 58 < T8 < 69<br>25 < T20 < 31<br>16 < T1 < 17 | 39 < T8 < 55<br>9 < T20 < 17<br>2 < T3 < 3    | 39 < T8 < 54<br>6 < T20 < 15<br>2 < T3 < 3    |
| <u>Etat Q91</u>                               | <u>Etat Q92</u>                               | <u>Etat Q93</u>                               | <u>Etat Q94</u>                               | <u>Etat Q95</u>                               | <u>Etat Q96</u>                               | <u>Etat Q97</u>                               |
| 40 < T8 < 54<br>9 < T20 < 17<br>2 < T3 < 3    | 39 < T8 < 56<br>4 < T20 < 13<br>2 < T3 < 3    | 42 < T8 < 52<br>4 < T20 < 10<br>2 < T3 < 3    | 38 < T8 < 56<br>5 < T20 < 15<br>2 < T3 < 3    | 41 < T8 < 53<br>18 < T20 < 156<br>0 < T4 < 0  | 36 < T8 < 53<br>156 < T20 < 15<br>0 < T4 < 0  | 36 < T8 < 52<br>3 < T20 < 13<br>0 < T4 < 0    |
| <u>Etat Q98</u>                               | <u>Etat Q99</u>                               | <u>Etat Q100</u>                              | <u>Etat Q101</u>                              | <u>Etat Q102</u>                              | <u>Etat Q103</u>                              | <u>Etat Q104</u>                              |
| 37 < T8 < 52<br>6 < T20 < 15<br>0 < T4 < 0    | 36 < T8 < 54<br>1 < T20 < 11<br>0 < T4 < 0    | 39 < T8 < 50<br>1 < T20 < 8<br>0 < T4 < 0     | 36 < T8 < 54<br>2 < T20 < 13<br>0 < T4 < 0    | 38 < T8 < 51<br>15 < T20 < 13<br>0 < T4 < 0   | 36 < T8 < 53<br>6 < T20 < 15<br>63 < T9 < 65  | 36 < T8 < 52<br>3 < T20 < 13<br>6 < T9 < 65   |
| <u>Etat Q105</u>                              | <u>Etat Q106</u>                              | <u>Etat Q107</u>                              | <u>Etat Q108</u>                              | <u>Etat Q109</u>                              | <u>Etat Q110</u>                              | <u>Etat Q111</u>                              |
| 37 < T8 < 52<br>6 < T20 < 15<br>63 < T9 < 65  | 36 < T8 < 54<br>1 < T20 < 11<br>63 < T9 < 65  | 39 < T8 < 50<br>1 < T20 < 8<br>63 < T9 < 65   | 36 < T8 < 54<br>2 < T20 < 13<br>63 < T9 < 65  | 38 < T8 < 51<br>15 < T20 < 13<br>63 < T9 < 65 | 21 < T8 < 47<br>49 < T9 < 59                  | 23 < T8 < 49<br>50 < T9 < 62                  |

Etat Q112

22  $\leftarrow$  T8  $\leftarrow$  46  
48  $\leftarrow$  T9  $\leftarrow$  59

Etat Q113

25  $\leftarrow$  T8  $\leftarrow$  53  
52  $\leftarrow$  T9  $\leftarrow$  64

Etat Q 114

31  $\leftarrow$  T8  $\leftarrow$  49  
55  $\leftarrow$  T9  $\leftarrow$  64

Etat Q 115

23  $\leftarrow$  T8  $\leftarrow$  52  
50  $\leftarrow$  T9  $\leftarrow$  63

Etat Q 116

25  $\leftarrow$  T8  $\leftarrow$  36  
50  $\leftarrow$  T9  $\leftarrow$  50

Etat Q 117

2  $\leftarrow$  T9  $\leftarrow$  38

Etat Q 118

1  $\leftarrow$  T1  $\leftarrow$  39

Etat Q119

2  $\leftarrow$  T9  $\leftarrow$  37

Etat Q 120

0  $\leftarrow$  T9  $\leftarrow$  39

Etat Q121

0  $\leftarrow$  T8  $\leftarrow$  1

Etat Q122

6  $\leftarrow$  T9  $\leftarrow$  33

Etat Q 123

0  $\leftarrow$  T9  $\leftarrow$  40

Etat Q124

0  $\leftarrow$  T8  $\leftarrow$  2

Etat Q 125

4  $\leftarrow$  T9  $\leftarrow$  25

Le temps de passage minimal et maximal de l'état  $Q_0$  (état initial) à l'état  $Q_{126}$  (état final) est égal :

$$T_{\min}(0,126) = 121$$

$$T_{\max}(0,126) = 237$$

La connaissance des intervalles du paramètre  $T$ , (174,241) pour la première solution (un seul robot) et (121,237) pour la deuxième solution (deux robots), offre la possibilité de les comparer d'une manière quantitative. Les différentes procédures de comparaison sont possibles. En supposant que le paramètre "T" est distribué sur l'intervalle donné selon la loi de distribution de la fig. 5.13.

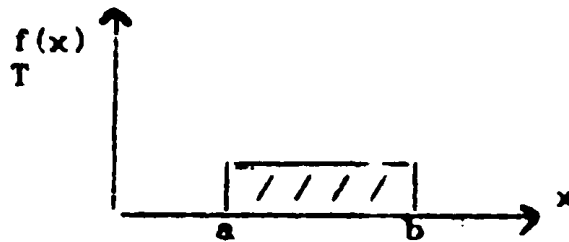


Fig. 5.13

l'espérance  $M(T)$  aura les valeurs suivantes pour les deux cas :

-  $M(T) = 207,5$  (cas d'un seul robot)

-  $M(T) = 179$  (cas de deux robots)

En conclusion, on peut affirmer que la deuxième solution est la meilleure (en moyenne).

#### CONCLUSION :

1. - La méthode énumérative des classes d'états a été développée pour l'obtention des estimations temporelles des Réseaux de Petri Temporisés (RPT). Ces estimations permettent de déterminer la caractéristique "Productivité" d'un système réel en fixant les conditions initiales et finales du système considéré. Le temps de passage entre ces deux positions est estimé par l'analyse du graphe de classe d'états.

2. - Un programme de la construction du graphe des classes d'états est réalisé en FORTRAN sur le VAX-750. Son utilisation donne la possibilité de construire le graphe, chose pratiquement impossible si on procède à l'analyse d'une manière manuelle à cause de la complexité de l'algorithme de l'analyse et de l'explosion des états.

3i - L'application de la méthode d'analyse du RPT au module à étudier a permis d'obtenir des estimations quantitatives pour deux solutions technologiques possibles :

- utilisation d'un seul robot
- utilisation de deux robots

Ces estimations peuvent servir comme base pour le choix d'une meilleure solution.

**- CONCLUSION GENERALE -**

---

1. - Le module technologique robotisé, considéré comme étant l'élément de base d'un atelier flexible, a été étudié du point de vue fonctionnel. Ce module possède plusieurs propriétés inhérentes aux ateliers flexibles tel que : plusieurs itinéraires pour les pièces de différents types, utilisation plusieurs fois de la machine, déplacement non linéaire de pièces pour un traitement secondaire, présence de facteur stockastique qui provoque les pannes des machines, fonctionnement asynchrone et parallèle de l'ensemble des machines, fonctionnement en temps réel de deux parties (système de commande et partie technologique. L'existence de ces propriétés exige lors de la première phase de la conception du module l'application de modèles bien adaptés aux caractéristiques citées précédemment.

En guise de tels modèles, les Réseaux de Petri classiques et temporisés ont été choisis car ils permettent une représentation facile des systèmes ayant les propriétés sus-cités et de traiter les problèmes spécifiques à ces systèmes. Les réseaux de Pétri classiques (RPC) sont destinés à la vérification du logiciel de fonctionnement du module. Les Réseaux de Petri temporisés (RPT) sont utilisés pour l'estimation des performances temporelles ; en particulier l'estimation de la productivité.

2. - La construction des modèles d'un objet est toujours accompagnée d'erreurs de conception du modèle, ceci est dû en général à l'utilisation heuristique et intuitive de l'outil de modélisation. Une procédure formalisée de construction a été proposée pour faciliter la conception des modèles et diminuer les risques d'erreurs de conception susceptibles d'être commis lors de la première étape de la conception des modèles. La procédure est basée sur la sélection des éléments de base de modélisation, sur le principe de la ressemblance de la structure naturelle de l'objet à étudier et celle modèle, et sur la présentation préliminaire des données technologiques dans la forme des automates finis et des protocoles d'échange d'information entre la partie technologique et le système de commande. Cette méthode a été appliquée au module technologique : élaboration d'un ensemble de sous-réseaux et du réseau général (ces réseaux présentent un nombre important de places et transitions).

3. - La vérification fonctionnelle des modèles élaborée est basée sur l'analyse des propriétés des Réseaux de Petri classiques tel que : borné, vivant, réinitialisable. L'absence de ces propriétés permet de conclure que soit le modèle n'est pas correct, ou bien l'objet présente un mauvais fonctionnement d'une certaine partie de l'algorithme, blocage des unités, omission de signaux commande ou d'information. Cette méthode d'analyse est basée sur la construction du graphe d'état selon l'algorithme de KARP. Les possibilités de cette procédure

présentent une limitation dans le cas des Réseaux ayant une dimension considérable. Dans ce cas deux approches ont été envisagées : L'une est basée sur les règles de réduction des réseaux, l'autre utilise l'ordinateur pour l'automatisation de l'analyse. L'application de la méthode de réduction au réseau initial possédant 107 places et 58 transitions a permis d'obtenir un réseau réduit considérablement simplifié. Un programme d'analyse par ordinateur a été élaboré en FORTRAN sur le VAX-750. L'application de ce programme au réseau a démontré ce "bon fonctionnement" du modèle et évidemment de l'objet de notre étude.

4. - Le passage des réseaux RPC au réseau RPT est réalisé par l'intégration du paramètre temps aux transitions. Un état dans ce cas est en fonction du marquage et de l'étiquette temporelle. Le paramètre temps associé aux transitions complique davantage l'analyse des Réseaux RPT. Une méthode d'analyse a été choisie : méthode d'énumération des classes d'états (MEN 82). L'inconvénient de l'utilisation de cette méthode est l'explosion combinatoire des classes d'états. Pour remédier à ce problème, une solution consiste à automatiser cette analyse. Un programme a été élaboré en langage FORTRAN.

L'analyse des réseaux RPT a été appliquée à l'étude des performances de deux structures technologiques possibles du module : l'une utilisant un robot, l'autre deux robots dans deux zones séparées. Les réseaux RPT correspondants ont été construits et analysés. Le résultat de cette analyse nous donne la possibilité de comparer les deux structures au point de vue quantitatif.



**- BIBLIOGRAPHIE -**  
-----

AGER 73

AGERWALA TILAK, FLYNN MIKE

Comments on capabilities - Limitations and correctness of Petri nets.

Proceedings of the first annual symposium on computer architecture - Decembre 1973 PP 81-86.

AGER 75

AGERWALA TILAK

Towards a theory for the analysis and synthesis of systems exhibiting concurrency. These de PHD John Hopkins University, Batimore Maryland 1975.

BER 79

Berthelot Gerard

Preuve de non blocage de programmes parallèles par réduction de réseaux de Petri. 1<sup>st</sup> European conference on parallel and distributed processing Toulouse, Fevrier 1979, PP 251-259.

BERTH 79

Bernard Berthomien

analyse structurelle des réseaux de Petri, méthode et outils, These de Docteur Ingenieur, Universite Paul Sabatier de Toulouse, Septembre 1979.

BRAMA 83

G.W. BRAMS.

Réseaux de Petri : théorie et pratique  $T_1$ ,  $T_2$  Masson, Paris 1983

BLA 79

M. BLANCHARD.

Automatismes : Crafcet ou réseaux de Petri le nouvel automatisme Mai 1979.

BOS 82

J.C. BOSSY, P. BRARD, P. FAUGERE, C. MERLAUD

"Le Crafcet, sa pratique et ses applications" Educative - 1982

GHOS 77

GHOS

Some comets on timed Petri Nets,  
Journée AFCET sur les réseaux de Petri, PARIS 1977.

HACK 75

HACK MICHEL.

Decision problems for Petri, nets and vector addition systems.  
Mac Technical Memorandum 59. MIT Mars 1975.

- KARP 69**            **KARP Richard - MILLER R.E.**  
Parallel Program Schemata.  
Journal of computer and systems Sciences 3, 1969 PP 147 - 195.
- KELL 76**            **KELLER Roberts M.**  
Formal verification of parallel programs communications of the  
ACM Vol 19 N° 7 Juillet 1976 PP 371 - 384.
- MART 67**            **MARTIN D.F., Estrin G**  
Models of computational systems cyclis acyclis graph  
transformations IEEÉ transactions on electronic computer,  
vol EC 16 Fevrier 1967, PP 70 - 79.
- MEN 82**            **MIGUEL MENASHE.**  
Analyse des réseaux de Petri temporisés et application aux  
systèmes distribués.  
These de Docteur ingénieur, université Paul SABATIER,  
Toulouse Novembre 1982.
- MERL 74**            **P.M. MERLIN**  
A study of de recoverability of computers systems.  
PHD thesis, University of California, Decembre 1974.
- MOAL 78**            **MOALLA M, PULOU J.P, SIFAKIS J.**  
Réseaux de Petri synchronisés. RAIRO Automatique, system  
analysis and control, vol 12 N° 2, 1978 PP 103-130.
- MOAL 84**            **Mohamed MOALLA**  
Méthodologie de conception des automatismes discrets.  
RVE Fac Sc. TUNIS, 1984, PP 59-79.
- MOAL 85**            **MOALLA Mohamed**  
Réseaux de Petri Interprètes et Craftet TSI, Janvier 85, AFCET.
- NOE 73**            **NOE J.D, NUTT G.J.**  
Macro E-NETS for representation of parallel systems.  
IEE transactions on computers vol. C 22, N° 08 - Aout 1977  
PP 718-727.

- PETE 77                    PETERSON J.L.  
Petri nets.  
Compting surveys, vol 9, N° 3, septembre 1977, PP 223 - 252
- PETE 81                    PETERSON J.L.  
Petri nets theory and modelling of systems. Prentice Hall 1981.
- PETR 62                    C.A. PETRI  
Kommunikation mit autonaten, Universität de Bonn, 1962.
- PRAD 79                    B. CHEZALVIEL - PRADIN  
Un outil graphique interactif pour la vérification des systèmes  
à évolutions parallèles décrits par réseaux de Petri.  
These Docteur Ingenieur, Universite Paul SABATIER, Toulouse,  
Decembre 1979.
- PRIN 81                    PRINGUET P.  
"L'atelier flexible un impératif décompétitivité"  
Machines-outils n° 382, Fevrier 1981.
- RAM 74                    C. RAMCHANDANI  
Analysis of asynchronous concurrent systems by timed Petri  
Nets PHD thesis, MIT, Fevrier 1974.
- SAADI 87                    SAADI Mohamed-Nacer  
Modélisation par les réseaux de PETRI 3ème séminaire national  
sur l'automatique, l'électricité industrielle, BOUMERDES -  
Novembre 1987.
- SIFA 77 1                    SIFAKIS J.  
Use of Petri nets of performance evaluation in measuring  
modelling and evaluating computer systems.  
North Holland publ. Co. 1977 PP 75-93.
- SIFA 77 2                    SIFAKIS J.  
Etude du comportement permanent des réseaux de Petri  
temporisés - Journées AFCET sur les réseaux de Petri PARIS 1977.

**SIFA 79 1**

**SIFAKIS J.**

**Le contrôle des systèmes asynchrones : concepts, propriétés, analyse statique.**

**These de Docteur Es-Sciences Mathématiques, Université scientifique et Médicale de Grenoble, INPC, Juin 1977.**

**SIFA 79 2**

**SIFAKIS J.**

**Performance evaluation of systems using nets**

**Net theory and applications. Lecture notes in computer Science N° 84. Springer Verlag 89 PP 307-319.**

**SIL 81**

**M. SILVA.**

**Sur le concept de macroplace et son utilisation par l'analyse de réseaux de Petri.**

**RAIRO automatique, Bordas, Dunod, Juillet 1980, Vol 15 N° 4 PP 335 - 345.**

**VAL 77**

**R. VALETTE, M. COURVOISIER.**

**Recherche d'un modèle adapté aux systèmes de commande de processus à évolutions parallèles. RAIRO automatique, vol 11 N° 1 1977, P 51 à 85.**

**VAL 80**

**R. VALETTE, M. COURVOISIER**

**Système de commande en temps réel, Edition SCM, PARIS 1980.**

**ZERV 77**

**ZERVOS Christian Radu.**

**Colored Petri Nets : their proprieties and applications these de PHD, University of Muchigan 1977.**

