

RÉSEAUX DE PÉTRI: APPLICATION À L'ANALYSE DES OPÉRATIONS PORTUAIRES

F.A.C.Mora-Camino¹, M.A.G.Neto de Matos², and A.Lopes Pereira³

1) F.A.C.Mora Camino Programme d'Informa- tique COPPE/UFRJ C.P.68511 Rio de Janeiro,Brésil	2)M.A.G.Neto de Matos Programme de Genie Na val COPPE/UFRJ C.P.68508 Rio de Janeiro,Brésil	3) A.Lopes Pereira Programme de Génie de Trans- ports COPPE/UFRJ C.P.68511 Rio de Janeiro,Brésil
---	---	---

I. Introduction

Ces dernières années, compte tenu des difficultés économiques mondiales, l'amélioration des conditions d'écoulement des biens à l'aide des systèmes de transport a acquis une importance particulière pour nombre de pays tant industrialisés qu'en voie de développement. L'amélioration des conditions d'opération des ports maritimes, comme des autres types de terminaux de transport, s'est trouvée à l'ordre du jour. Deux grandes classes de mesures ont été envisagées:

- réaménagement portuaire impliquant des investissements lourds,
- optimisation des installations existantes au travers d'une reformulation des procédés d'opération utilisés.

Pour nombre de pays en voie de développement, seules des mesures de cette deuxième classe étant à moyen terme envisageables, une recherche a été réalisée au sein de l'Université Fédérale de Rio de Janeiro afin d'élaborer une approche d'optimisation de l'opération d'un port, que celui-ci soit spécialisé (port minéralier par exemple) ou non. Il est apparu qu'un port se présente comme un système de grandes dimensions où interagissent différents types d'agents et d'équipements dans le but de véhiculer et/ou stocker différents types de marchandises. Ainsi l'opération d'un port se caractérise par l'existence de différents types de flux et de stocks de marchandises dont l'évolution est soumise à des règles extrêmement complexes résultant des contraintes d'opération liées à la disponibilité des équipements et des informations nécessaires.

Divers modèles de simulation ont été développés afin d'évaluer les performances opérationnelles d'un port. Ces modèles sont basés sur la Théorie des Files ou alors utilisent quelque technique de simulation discrète afin de fournir des estimations de temps d'attente, de retards, de niveaux maximum de stocks, etc... Il est à noter aussi que dans le cas des modèles de simulation utilisant la Théorie des Files, de grandes approximations doivent être admises afin de conduire à des résultats analytiques, alors que dans l'autre cas, la mise en oeuvre d'un modèle de simulation est extrêmement coûteuse. Ainsi, ces modèles ne semblent pas adéquats à l'aide à l'élaboration de nouvelles politiques d'opération des ports et constituent uniquement des outils de prévision ou d'évaluation.

Dans cette communication, le port est envisagé comme un système complexe où différents processus peuvent se dérouler aussi bien de façon parallèle (indépendamment les uns des autres) que de façon concurrente suivant des règles extrêmement compliquées. Il est proposé ici d'utiliser la représentation des réseaux de Pétri afin de modéliser les différentes tâches réalisées dans un port en tenant compte de façon explicite des restrictions liées aux équipements (mouvement de grues sur un unique rail par exemple) ou à la disponibilité d'informations (document autorisant l'embarquement par exemple).

II. Les réseaux de Pétri

Les réseaux de Pétri constituent une classe de graphes utilisés pour l'étude des propriétés d'interconnexion de systèmes parallèles ou concu-

rents. Les principales applications de cette technique l'ont été, à ce jour, dans le secteur de l'informatique et de l'automatique.

Un réseau de Pétri marqué est un couple $R = (G, M)$ où $G = (T \cup P, V, A)$ est un graphe orienté biparti dont les arcs de l'ensemble V sont valués, T est l'ensemble des sommets de "transition" et P est l'ensemble des sommets "Places" du réseau, V est l'ensemble des arcs du graphe biparti tel que :

$$v \in V \Rightarrow v = (t, p) \text{ ou } v = (p, t) \text{ avec } p \in P \text{ et } t \in T \quad (1)$$

A est une valuation entière de l'ensemble V :

$$A: V \rightarrow \mathbb{N} : \begin{cases} (p, t) \rightarrow a_{pt} \\ (t, p) \rightarrow a_{tp} \end{cases} \quad (2)$$

M est un marquage, application de P dans \mathbb{N} :

$$M: P \rightarrow \mathbb{N} : p \rightarrow m_p \quad (3)$$

Ce marquage est destiné à être modifié durant le fonctionnement du réseau de Pétri.

Les transitions correspondent généralement à des tâches à être réalisées, alors que les places correspondent à la réalisation de conditions logiques telles que par exemple la disponibilité d'une ressource nécessaire à l'exécution de diverses tâches.

Sur la figure 1 est représenté un exemple de réseau de Pétri.

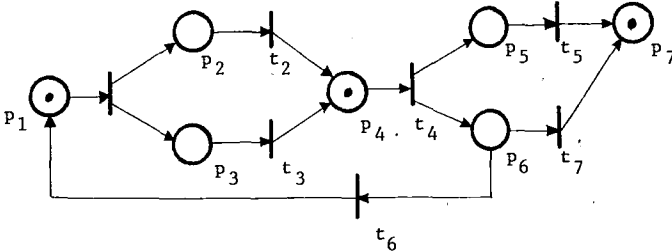


Figure 1: exemple de réseau de Pétri

$$T = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5, t_6, t_7\}, \quad P = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7\}$$

$$V = \{(P_1, t_1), (t_2, P_2), (t_1, P_3), (P_2, t_2), (P_3, t_3), \dots, (t_5, P_7), (t_6, P_1)\}$$

$$A: v \in V : a_v = 1, \quad v \notin V : a_v = 0$$

$$m' = (1, 0, 0, 1, 0, 0, 1)$$

Ce simple exemple présente diverses particularités intéressantes :

- parallélisme entre processus (transitions t_2 et t_3)
- activités séquentielles (transitions t_6 puis t_1 par exemple)
- activités concurrentes (transitions t_6 et t_7)
- redistribution de ressources (transitions t_1 ou t_4)
- intégration de ressources (transitions t_2 et t_3 ou t_5 et t_7)
- réalimentation (feedback) (transition t_6)

Les marques (m_p) de chaque place (p) correspondent généralement à un nombre entier de ressources d'un certain type mises à disposition par les activiI

tés antérieures. Le fonctionnement du réseau de Pétri permet de suivre l'évolution de ces ressources en fonction du déclenchement et du déroulement de ces activités.

Une transition est franchissable pour tout marquage \underline{m} si:

$$\forall p \in {}^*t : m_p \geq a_{pt} \quad (4)$$

où *t est l'ensemble des places antérieures à la transition t . Le tir de la transition (le déclenchement d'une activité) se traduit par un nouveau marquage qui correspond au transfert ou à la transformation des ressources. Le nouveau marquage est donné par:

$$\forall p \in {}^*t : m'_p = m_p - a_{pt} \quad (5)$$

$$\forall p \in t' : m'_p = m_p + a_{pt} \quad (6)$$

où t' est l'ensemble des places indiquées par la transition t . Par exemple, dans le cas de la figure 1, le tir de la transition t_4 se traduira par le marquage $m' = (1,0,0,0,1,1,1)$.

Diverses propriétés peuvent être recherchées dans les réseaux de Pétri, notamment:

- la limitation des marques des places, ce qui correspond à la non existence de files d'attente infinies en des points de blocage,
- la vivacité du réseaux, caractérisée par l'existence d'un marquage initial qui peut garantir l'activation d'une transition.
- la réinitiability du réseau qui garantit la possibilité de retourner, après un nombre quelconque de tirs de transitions, à l'état initial (caractérisé par un marquage \underline{m}_0).

A ce propos, diverses techniques, issues de la Théorie des Graphes et de la Programmation Combinatoire, ont été développées.

Plus récemment, les réseaux de Pétri temporisés ont été introduits afin de permettre aussi l'analyse des conditions dynamiques d'opération de systèmes complexes discrets. Ainsi, l'on considère que le tir d'une transition n'est plus instantané, mais occupe un certain délai entre le début du traitement et sa conclusion. Ainsi, un réseau de Pétri temporisé peut être défini comme: $A = (R, d, E^0)$, où R est un réseau de Pétri classique, sous-jacent, d est la temporisation des transitions et E^0 est un état initial caractérisé par un marquage initial et les durées résiduelles des transitions en activité à l'instant initial.

Dans ce cas l'évolution des marques suivra les équations:

$$\forall t \geq 0 \quad \forall p \in P : m_p^+(t) = m_p^0 + \sum_p F_i(t) - \sum_p D_i^+(t) \quad (7)$$

$$\forall t \geq 0 \quad \forall p \in P : m_p^-(t) = m_p^0 + \sum_p F_i(t) - \sum_p D_i^-(t) \quad (8)$$

où

m_p^0 est la marque initiale de la place p ,

$m_p^+(t)$ est la marque de la place p après l'intervalle $[\underline{0}, \underline{t}]$,

$m_p^-(t)$ est la marque de la place p à la fin de l'intervalle $[\underline{0}, \underline{t}]$,

*P est l'ensemble des transitions conduisant à la place P ,

P' est l'ensemble des transitions issues de la place P ,

$F_i(t)$ est le nombre fini de tirs de la transition i sur $[\underline{0}, \underline{t}]$,

$D_i^-(t)$ est le nombre de débuts de tirs de la transition i sur $[0, t[$,

$D_i^+(t)$ est le nombre de tirs de la transition i sur $[0, t]$.

Les durées résiduelles de tirs seront données par:

$$R_i(t) = 0 \quad \text{si} \quad 0 \leq t \leq x_i^1 \quad (9)$$

$$R_i(t) = x_i^n + d_i - t \quad \text{si} \quad x_i^n < t \leq x_i^n + d_i \quad (10)$$

$$R_i(t) = 0 \quad \text{si} \quad x_i^n + d_i < t < x_i^{n+1} \quad (11)$$

où x_i^n est le n -ième tir de la i -ième transition et d_i est la durée de la transition i .

Ans, une transition i sera tirable à l'instant θ si:

$$\forall p \in T : m_p^-(\theta) > 0 \quad (12)$$

L'on peut définir une "exécution contrôlée" comme une séquence de tir pour chacune des transitions du réseau. Une telle exécution contrôlée sera caractérisée par l'ensemble $\{D_i^+(t), t \in [0, \theta], i \in T\}$. Une telle exécution contrôlée sera réalisable si:

$$\forall t \geq 0, t \leq \theta : \forall p \in P : m_p^+(t) \geq 0 \quad (13)$$

En fait, une exécution contrôlée correspond à une programmation des diverses activités à développer sur un certain intervalle de temps.

III. Caractéristiques essentielles des activités portuaires

Un port est un système complexe constitué de nombreux sous-systèmes interconnectés. Le flux des activités portuaires peut être considéré comme composé de trois cycles distincts et complémentaires:

- le cycle des navires
- le cycle de la charge
- le cycle du transport terrestre

Le cycle de charge, qui correspond à l'activité fin du port, peut être subdivisé en quatre étapes principales:

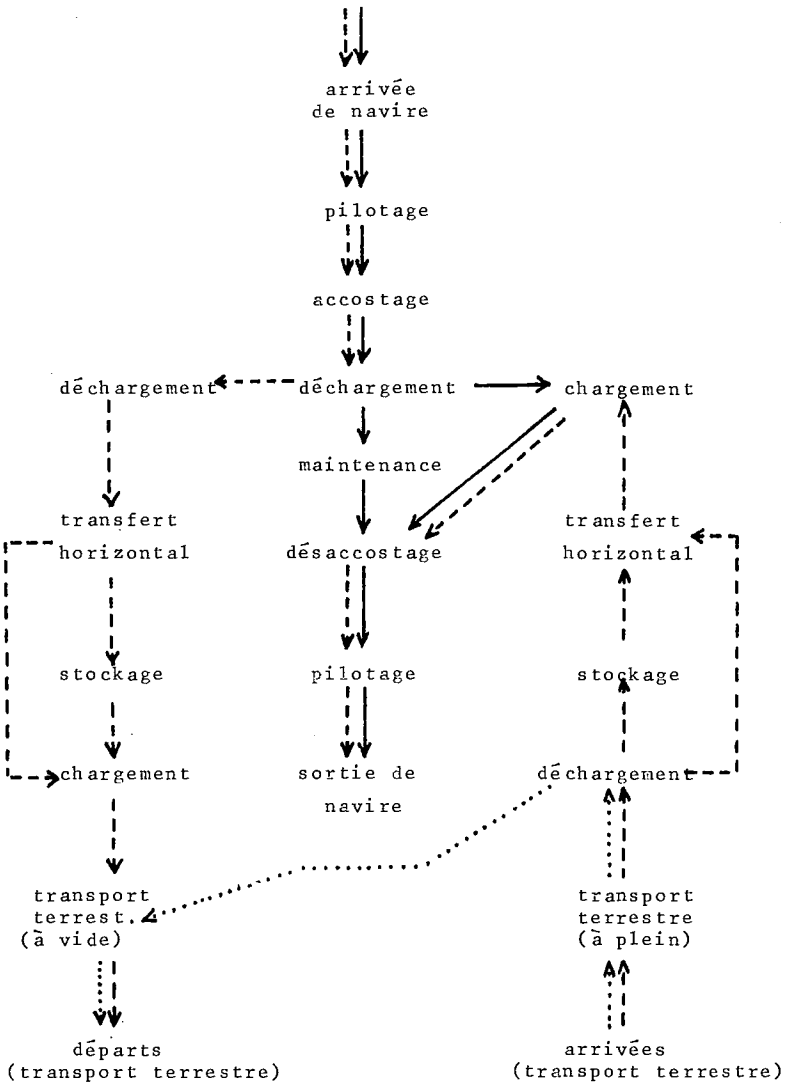
. le transfert vertical qui correspond aux activités de manipulation de la charge entre le navire et le quai, et vice versa, les opérations de hord et de transbord.

. le transfert horizontal qui correspond aux activités de manipulation de la charge sur les quais et à son transfert vers les lieux d'entrepôt ou d'expédition par voie de terre.

. l'entreposage, ou transfert "dans le temps" qui permet d'absorber les disfonctions temporelles entre les opérations de charge et de décharge, et la disponibilité de moyens de transport intérieur.

. l'expédition et la réception de charge vis à vis du système de transport terrestre associé au port.

Le cycle des navires correspond aux manoeuvres nécessaires pour réaliser d'une part l'accès des navires aux quais et d'autre part pour réaliser leur retour en pleine mer. Celui-ci diffère d'un port à l'autre en fonction des caractéristiques portuaires locales. L'on peut distinguer les étapes suivantes: entrée et évolution dans le canal d'accès, attente, remorquage, manoeuvre d'accostage, attente à quai, manoeuvre de désaccostage, remorquage, évolution et sortie du canal d'accès.



- flux de navires ———→
- flux de charge - - - ->
- flux de transport terrestre ·····→

Figure 2: Diagramme de flux des opérations portuaires

Le cycle de transport terrestre représente une contrepartie au cycle de navires. Celui-ci peut se réaliser à l'aide de trois modes de transport: le transport routier (camions), le transport par chemin de fer et le transport par voie fluviale, la nature de la charge déterminant généralement le choix du mode de transport.

L'intégration de ces trois cycles par la coordination de leur activités, est un facteur essentiel pour l'opération harmonieuse et efficace d'un port. En fait cette intégration correspond à un problème dont la solution est constamment remise en question par la nature même du port: celui-ci affronte chaque jour une situation différente dont l'évolution correspond à des facteurs de court, moyen et long terme. A court terme, l'on peut citer la grande diversité des charges reçues ou expédiées (minerais, dérivés du pétrole, charge générale se présentant sous forme de conteneurs ou de palettes) l'extrême variabilité de leurs proportions. D'autre part l'arrivée d'un navire à quai, ou d'un chargement terrestre, se traduit immédiatement par la mobilisation de ressources (machines et main d'oeuvre d'opération et d'administration) éventuellement pulvérisées au sein d'opérations antérieures distinctes.

A moyen terme, l'on peut citer les effets saisonniers liés au climat: conditions climatiques et météorologiques (en moyenne) saisonnières, exportation ou importation de récoltes.

A long terme, l'on peut citer les effets liés aux progrès technologiques et à la rationalisation des activités portuaires: augmentation de la capacité des navires, généralisation de l'utilisation de conteneurs standardisés, création de terminaux spécialisés, réorganisation administrative, réorganisation du travail, introduction de nouvelles technologies (systèmes automatisés de contrôle de flux, robots industriels, équipements polyvalents, etc...).

En fait, l'on peut dire qu'un port se présente comme un système dynamique discret soumis de façon aperiodique à des sollicitations qui se traduisent par la mobilisation de ressources limitées pour traiter des flux et des stocks de charges de diverses natures, l'un des principaux problèmes rencontrés étant ceux liés à l'apparition de goulots d'étranglement et à l'utilisation efficace des ressources disponibles. La solution de ces problèmes passe par un dimensionnement adéquat des installations et des équipements portuaires et d'autre part par le choix adéquat de séquences d'activités.

IV. Modélisation des Activités Portuaires

A ce jour, deux techniques ont été utilisées pour modéliser les activités d'un port:

- la Théorie des files;
- la simulation discrète par événements.

La théorie des files a été utilisée dans les problèmes de dimensionnement d'installations et d'équipements portuaires (dimensionnement d'aires d'attente ou de stockage, dimensionnement de quais et de matériel de charge/décharge). Celle-ci correspond à une vision simplifiée et agrégée des activités d'un port et nécessite pour son développement analytique de l'adoption d'hypothèses classiques en ce qui concerne les processus stochastiques considérés (arrivées suivant la loi de Poisson, en général). Cette approche s'intéresse principalement aux temps d'attente et à la dimension des files d'attentes à partir de taux moyens d'utilisation des équipements et de temps moyen de service. L'on peut par exemple donner le modèle suivant proposé par Shneerson pour le temps moyen d'attente des navires dans un port:

$$W = \frac{1}{\eta N - \lambda . P} + \frac{1}{\eta} \quad (14)$$

où W est le temps moyen d'attente des navires,
 λ est le taux d'arrivées (navires/jour)
 η est le taux de service (navires/jour)
 N est le nombre de quais
et P_r et la probabilité que tout les quais soient occupés et est donnée par:

$$P_r = \left(\frac{\eta}{\lambda}\right) \left(1 - \frac{N!(1-P/N)}{P^N \cdot P_0}\right) + \frac{N!(1-P/N)}{P^N \cdot P_0} \quad (15)$$

où P est la probabilité de trouver les canaux d'accès occupés,
 P_0 est la probabilité de trouver le port vide, P étant donnée par:

$$P = \frac{(nb)^n}{n!(1-b)^n} \cdot \frac{1}{\sum_{i=0}^{n-1} \frac{(nb)^i}{i!} + \frac{(nb)^n}{n!(1-b)^n}} \quad (16)$$

où n est le nombre de canaux d'accès au port,
 b est le taux d'occupation ($=\lambda \cdot n$).

Ainsi, cette approche correspond à une représentation figée des activités portuaires, celle-ci suppose résolus tous les problèmes de coordination entre activités, d'affectation d'équipements et ne considère pas les effets de fluctuations des niveaux de demande de services portuaires. Ainsi, si en ce qui concerne les problèmes de planification à moyen ou long terme d'un système portuaire, la Théorie des Files présente quelque attrait, en ce qui concerne la résolution de problèmes de planification de court terme et d'opération, celle-ci semble être insuffisante.

Face à cette approche déjà classique, et compte tenu du développement de la technologie des calculateurs électroniques, plus récemment il a été tanté de développer des modèles complets de simulation portuaire. L'on peut par exemple citer les modèles PORTSIM et SIMPOR. Ceux-ci sont capables de simuler l'opération complète d'un port de configuration quelconque et se présentent de façon modulaire. La simulation se réalise autour d'événements significatifs tels que: arrivée d'un navire, début ou fin d'une opération, etc.. La structure générale de tels programmes est représentée sur la figure 3. Généralement, de tels modèles génèrent un flux immense d'informations souvent difficiles à analyser. Ici, il est possible de représenter de façon fine toutes les activités notables, pourtant il n'est pas possible de représenter les processus d'arbitrage et de choix, une solution ou une stratégie doit être pré définie, programmée et simulée. Ainsi, une modification dans l'organisation des activités portuaires, se traduira ici, non pas par la modification de la valeur de quelques paramètres, mais bien par la réécriture d'un module de programme de complexité souvent importante, ce qui montre le manque de flexibilité d'une telle approche.

L'on voit donc que ces deux techniques présentent des limitations (Théorie des Files) ou difficultés d'utilisation (simulation discrète par événements). Il est à propos de citer ici la technique de simulation mixte (modèles de files et événements discrets) proposée par Pritsker pour simuler les systèmes dynamiques discrets de flux et stocks. Néanmoins, la réserve présentée en ce qui concerne les modèles de simulation discrète par événements, restera valable.

V. Utilisation des Réseaux de Pétri

Dès 1983, nous avons signalé l'intérêt des réseaux de Pétri pour l'analyse de l'opération d'un système portuaire en vue de la construction d'un mo

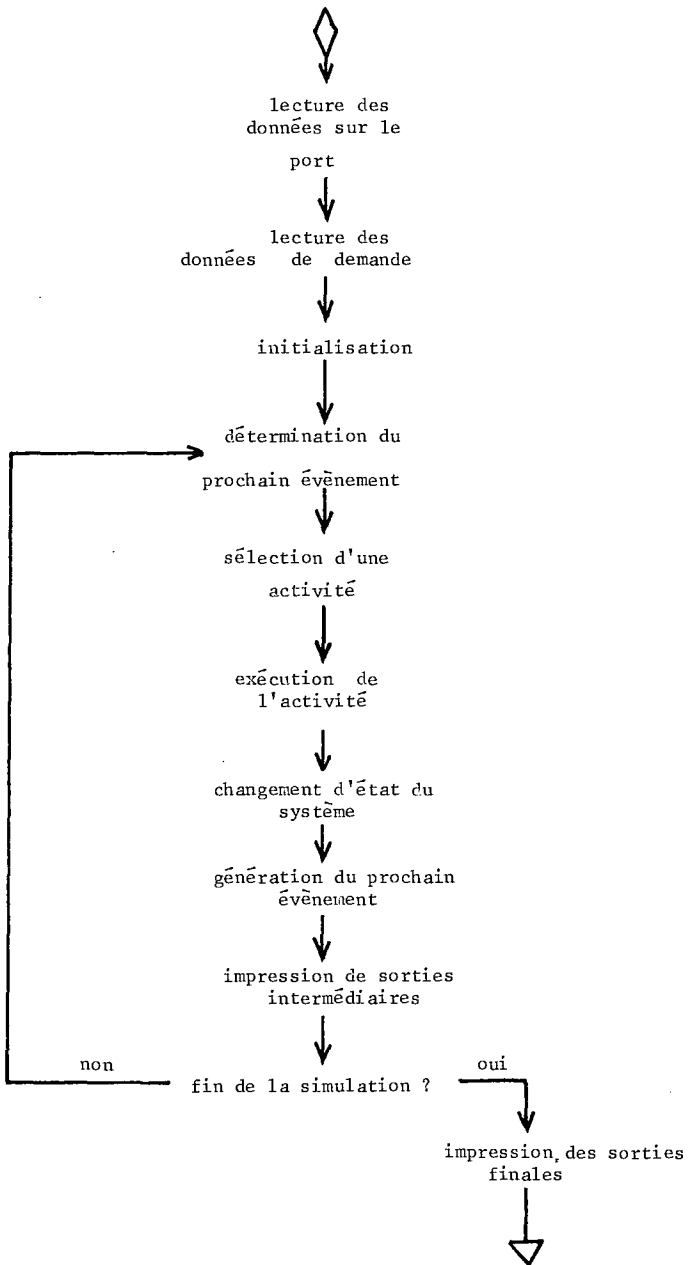


Figure 3: Structure générale d'un modèle de simulation par événements de l'opération d'un port.

dèle de simulation. Dans ce paragraphe, nous nous efforcerons de démontrer comment les réseaux de Pétri peuvent être d'un intérêt direct pour l'analyse et la décision en ce qui concerne les opérations portuaires.

En premier lieu, l'"interprétation" d'un réseau de Pétri nous permet de représenter de façon simple l'enchaînement et l'interdépendance existant entre activités et ressources. Ainsi, les diverses activités peuvent être représentées par des transitions, celle-ci nécessitent pour être tirables de plusieurs éléments d'entrée:

- document ordonnant ou autorisant l'activité, (1)
- main d'oeuvre d'opération (dockers, pilotes, etc..) (2)
- équipement d'opération (grues, remorqueurs, balance, etc...) (3)
- charge et/ou véhicules de transport (4)

Chacun de ces éléments pourra être identifié par un type distinct de "places". De même, l'on peut distinguer quatre types d'arcs:

- les arcs qui correspondent au transfert d'information,
- les arcs qui correspondent à l'utilisation de main d'oeuvre,
- les arcs qui correspondent à l'utilisation d'équipements,
- les arcs qui correspondent à des flux physiques (charge ou véhicules).

Ainsi, sur la figure 4 est montrée la représentation par réseau de Pétri interprété d'une partie des opérations relatives au cycle de navires. Chacune des activités (notamment l'activité de maintenance) pourrait être à son tour décrite plus finement à l'aide de cette même technique. Dans cet exemple, l'on note que trois navires sont en attente à l'entrée du port, deux desquels sont déjà autorisés à mouiller, pourtant il n'y a pas de pilote disponible, de même deux navires attendent la disponibilité de remorqueur pour acoster sur deux quais libres, un navire à quai attend la disponibilité d'une grue pour être déchargé, etc...

Il est à noter ici que pour accroître le réalisme de cette représentation, il est possible de compléter celle-ci en incluant des éléments tels que:

- processus aléatoires d'arrivée de véhicules,
- processus de distribution aléatoire des résultats d'activités,
- équations dynamiques de conservation de flux de véhicules, de charge et du nombre d'équipements et d'équipe.

Finalement, nous montrerons brièvement l'application de quelques résultats développés par Chrétienne pour l'analyse de réseaux de Pétri temporisés.

Ainsi, étant donnée une programmation d'activités, celle-ci sera réalisable si, par simulation des équations (7)-(8), l'on vérifie la relation (13).

De même, il sera possible de minimiser la mobilisation d'équipements ou de main d'oeuvre pour satisfaire à une programmation d'activités en affectant ces ressources de la façon suivante (la marque d'un réseau de Pétri correspondant à une affectation de ressources):

$$\forall p: m_p^*(t_{n+1}) = \max / m_p^*(t_n), - \sum_p F_i(t) + \sum_p D_i^+(t) / \quad (17)$$

avec $m_p^*(t_0) = 0$

où t_n , $n = 1, 2, \dots$ est la séquence des instants où l'une des transitions est initialisée.

Dans le cas où l'on s'intéresse à la capacité d'opération du système

portuaire, il est possible d'assimiler celle-ci à une opération périodique, ce qui permettra d'évaluer immédiatement les taux d'activité et les temps moyens de service. En fait, ces résultats constitueront une limite inférieure. L'on peut alors utiliser le théorème suivant:

Une condition nécessaire et suffisante pour qu'une programmation périodique d'activités soit réalisable est que les fréquences d'opération et les décalages initiaux vérifient les inégalités suivantes:

$$\forall p \in P : \sum_P f_i \cdot x_i^1 - \sum_P f_i \cdot x_i^1 \geq \delta(p) - m_p(0) \quad (18)$$

et

$$\forall i \in T : 0 \leq x_i^1 \leq r_i \quad (19)$$

où f_i est la fréquence d'opération de la transition i ,

$\delta(p)$ est le nombre de transition adjacentes à la place p ,
 r_i est la période de tir de la transition i ($r_i = 1/f_i$).

En fait, tant la relation (17), comme les relations (18) et (19) doivent permettre l'élaboration d'une part d'une affectation efficace des ressources d'opération, comme une bonne coordination entre les diverses activités. Il est aussi intéressant de remarquer que ces deux derniers résultats peuvent s'appliquer à des représentations du système avec différents niveaux d'agrégation. Par exemple, au niveau de macroactivités, il sera aisé d'utiliser la relation (17) pour dimensionner les équipements nécessaires à la réalisation d'un plan d'opération, alors qu'au niveau de détail d'une activité composée de microactivités répétitives (chargement ou déchargement de conteneurs, composition d'un train, etc...) il pourra être utile de considérer les relations (18) et (19) pour assurer une opération harmonieuse

VI. Conclusion

Cette communication traite du problème de la représentation, de l'analyse et de la programmation des activités portuaires. Une technique, aux développements récents, est présentée. Celle-ci propose une nouvelle approche pour la résolution de problèmes d'ordonnement entre activités concurrents ou/et parallèles et semble être bien adaptée à la problématique portuaire, tant en ce qui concerne la représentation de ces activités, la détection de propriétés structurelles du système, l'élaboration de programmes d'activités efficaces et le dimensionnement des équipements nécessaires à l'opération proposée. Ainsi les réseaux de Pétri temporisés se présentent comme un nouvel instrument d'aide à la rationalisation des opérations portuaires.

Bibliographie:

1. Chrétienne, P. (1983), "Les réseaux de Pétri temporisés", Thèse de Doctorat d'état, Université Pierre et Marie Curie, Paris.
2. Zuberek, W.M. (1985), "Generalized M-Timed Petri Nets and Performance Evaluation of Computer Systems", INFOR, vol.23, n° 3, August, pp.344-361.
3. World Bank Group, (1979), "Port Simulation Model (PORTSIM)", World Bank, New York.
4. Vieira, L.F.M. (1985), "Modelo de Simulação de Operações Portuárias - SIMPOR", Thèse de Mestrado, Université Fédérale de Rio de Janeiro, Brésil.

5. Shneerson, D. (1983), "Short Term Planning for a Ports System", Maritime Policy and Management, vol.10, n°4, Oct-Dec., pp.217-250.
6. Mora-Camino, F.A.C. and L.F.M.Vieira (1984) "Ports Operations: Some New Considerations for Modelling and Simulation", Modelling Simulation & Control, AMSE Press, vol.1, n° 2, pp.29-38.
7. Roy, B. (1970), "Problèmes d'ordonnement et ensembles de potentiels sur un graphe", Algèbre Moderne et Théorie des Graphes, Dunod ed., tome 2.
8. Redgen C.N., A.A.B.Pritsker (1979), "SLAM-Simulation Language for Alternative Modelling", SIMULATION, November, pp.145-157.