

MODELISATION MODULAIRE DES ACTIVITES DE MAINTENANCE DANS UNE STRUCTURE MULTI-SITES

Ahmad ALALI ALHOUIJ, Zineb SIMEU-ABAZI

Laboratoire G-SCOP
46 avenue Félix Viallet
38031 Grenoble cedex 1

Ahmad.ALALI-ALHOUIJ@g-scop.inpg.fr, zineb.simeu-abazi@g-scop.inpg.fr

RESUME : Cet article concerne la modélisation des activités de maintenance dans un contexte distribué. On s'intéresse plus particulièrement au cas où l'on dispose d'un atelier de maintenance central (AdMc) dans lequel les réparations sont réalisées et d'un atelier de maintenance mobile (AdMm) qui peut intervenir pour faire des remplacements sur plusieurs sites suivant un ordonnancement prédéfini. Il s'agit alors de dimensionner les ressources; (pièces de rechange dans les AdM et les opérateurs de maintenance). Une démarche de modélisation modulaire d'une structure multi-sites est proposée. Le but est d'améliorer la disponibilité des sites de production tout en minimisant le coût de la maintenance.

MOTS-CLES : maintenance distribuée, modélisation, Réseaux de Petri Stochastiques (RdPS), disponibilité, coût, ordonnancement.

1. INTRODUCTION

Dans les secteurs d'activité où la disponibilité des équipements est primordiale, la notion d'Atelier de Maintenance s'est développée. Un atelier de maintenance (AdM) prend en charge non seulement, la réparation des équipements mais aussi les actions préventives d'inspection et de remplacement. Dans un contexte distribué, cet atelier (AdM) peut être utilisé pour assurer la maintenance des équipements venant de différents sites de production. Afin de réduire l'occurrence des défaillances, l'AdM doit gérer les ressources (opérateurs, outillage et pièces de rechange), assurer le suivi en temps réel de l'état des équipements dans les différents sites et planifier les actions préventives. Pour améliorer la disponibilité des équipements de production et minimiser les coûts de maintenance il est donc nécessaire de bien dimensionner les ressources et bien planifier les actions préventives. Le dimensionnement des ressources concerne aussi bien la gestion des opérateurs de maintenance que l'outillage et pièces de rechange. Quant aux actions préventives, il s'agit de définir un échéancier robuste, capable d'absorber les aléas de fonctionnement et garder un bon niveau de sécurité.

Dans ce contexte distribué, les activités de maintenance se retrouvent réparties entre les deux structures suivantes:

- l'AdM central qui réalise le processus de réparation – maintenance corrective;
- l'AdM mobile qui effectue des inspections et remplacement sur les différents sites de production.

La figure 1 représente le contexte de l'étude et met en évidence les relations entre les différents sites [Semeu-abazi, 2007].

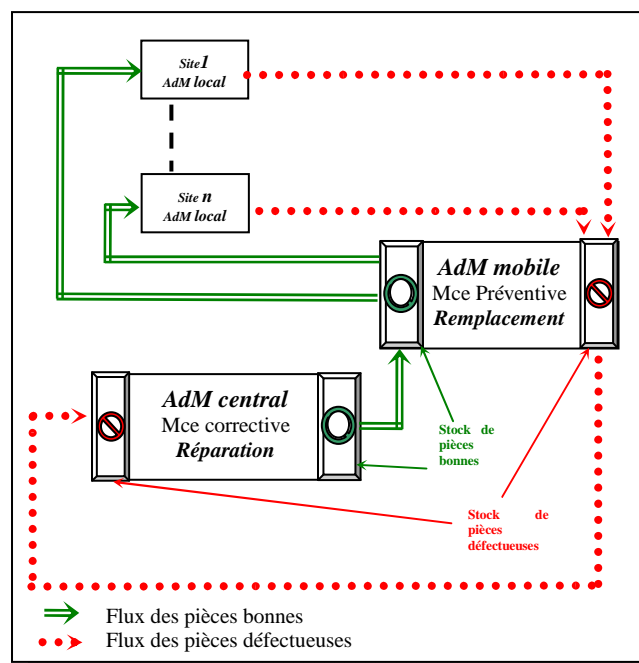


Figure 1. Relations entre les différents sites de production et les ateliers de maintenance

De ce fait, ce contexte distribué nécessite le développement de nouvelles techniques de modélisation et d'ordonnancement des tâches de maintenance. La simulation des modèles permet de prendre en compte les interac-

tions entre les différents sites et de dimensionner les ressources. Des travaux de recherche plus orientés dans le domaine du naval, ont porté sur l'optimisation de la disponibilité des navires marchands en proposant un dimensionnement des pièces de rechange avec un coût d'investissement limité (Rustenburg, 2000), (Lau *et al.*, 2006), (Keizers *et al.*, 2001). D'autres concernent le dimensionnement de pièces de rechange dans le domaine spatial (Caggiano et Muckstadt, 2000).

Une démarche méthodologique sur l'application de la maintenance centralisée aux systèmes de production a été élaborée récemment. Elle concerne plus particulièrement la conception d'un atelier de maintenance intégré dans un système de production (Abbou, 2003), (Abbou et al., 2004). L'AdM est alors intégré et dédié à la maintenance de certains équipements dont la réparation englobe plusieurs phases (diagnostic, désassemblage, réparation proprement dite selon le type de défaillance, assemblage et test).

Cet article s'intéresse plus particulièrement au cas où l'on dispose d'un AdM central et d'un AdM mobile qui peut intervenir pour faire des remplacements sur plusieurs sites suivant un ordonnancement prédéfini. Il s'agit alors de dimensionner les ressources; (pièces de rechange dans les AdM fixes ou mobile et les opérateurs de maintenance). Une démarche de modélisation modulaire d'une structure multi-sites est proposée. Le but est de minimiser le coût moyen par l'application d'une politique d'inspection adéquate de l'atelier mobile.

Après une présentation succincte du cadre de travail, l'outil de modélisation choisi (les réseaux de Petri) est présenté. A travers un cas d'étude, une modélisation des ateliers de maintenance (centrale et mobile) est proposée avec quelques résultats de simulation. Des perspectives sur les orientations de ces travaux termineront cet article.

2. Outil de modélisation

Les réseaux de Petri constituent un outil très bien adaptée à la modélisation et l'analyse de systèmes complexes présentant de la concurrence et de la synchronisation. Ils ont été introduits par Carl Adam Petri en 1962 afin de décrire le comportement global des systèmes complexes et effectuer des analyses qualitatives.

Un RdP est composé:

- d'un ensemble de places représentant les états divers du système (représentées par des cercles).
- d'un ensemble de transitions expliquent la possibilité du changement d'état du système (représentées par des rectangles).
- d'un ensemble d'arcs orientés lient entre les places et les transitions.
- des marques (ou des jetons) représentés par des points noirs dans les places constituant le réseau.

Cet outil a fort pouvoir descriptif à représenter et à analyser le comportement de systèmes complexes, y compris les phénomènes de synchronisation, parallélisme, concurrence ou encore le partage des ressources.

Plus tard, en 1978, les réseaux de Petri stochastiques (RdPS) ont été introduits [Natkin, 80] et [Molloy, 81]. Ils permettent de calculer des probabilités et les statistiques ainsi que la prise en compte des événements aléatoires comme l'occurrence de défaillances.

La prise en compte de transitions immédiates (instables) et des transitions stochastiques (stables ou temporisées), a permis de définir une extension des RdPS appelé RdPS Généralisés (RdPSG).

Plusieurs modules de RdP, peuvent être synchronisés par des événements extérieurs. Cette dépendance est réalisée grâce à des liens entre les différents modules, qui conditionnent le franchissement d'une transition. C'est la notion des RdP Synchronisés (RdPSy) [Moalla, 78]. Dans cet article nous avons étendu la notion d'événements de synchronisation à des événements venant aussi bien de l'extérieur que de l'intérieur du système. C'est dans ce cas les RdPSy Internes (RdPSyI).

3. Application au contexte distribué

L'objectif est de proposer une démarche de modélisation et d'évaluation des performances d'un ensemble de sites de production en tenant compte des interactions entre les sites. Les performances attendues concernent l'amélioration de la disponibilité des sites de production, la minimisation du nombre de défaillances et des coûts de maintenance.

La prise en compte des actions correctives est faite grâce à l'utilisation RdP Stochastiques. Ils permettent de modéliser des systèmes soumis à des paramètres aléatoires tels que les pannes ou les réparations. Pour prendre en compte des actions préventives, les RdPS généralisés (RdPSG) sont utilisés. En effet, il est nécessaire de prendre en compte des transitions immédiates (instables) où le temps du séjour est considéré comme nul, et des transitions stochastiques (stables ou temporisées). Lorsqu'un marquage valide à la fois des transitions immédiates et de transitions temporisées, la priorité est donnée aux franchissements des transitions immédiates. Les échanges entre les différents sites (production et maintenance) sont réalisés grâce à des signaux de synchronisation. Nous utilisons pour cela les RdPSG à Synchronisation Internes où les différents modules sont synchronisés par des événements externes ou internes.

L'outil RdPSyI est bien adapté au contexte distribué. La décomposition du système complet en différents modules, permet une analyse modulaire de notre système. C'est ainsi que nous proposons une représentation et une analyse hiérarchique du système décomposé de la façon suivante :

1. Un modèle générique représentant les sites production SdPi
2. Un modèle générique représentant l'atelier de maintenance central (AdMc).
3. Un modèle générique du stock de l'atelier mobile (AdMm)
4. Un modèle représentant l'atelier de maintenance mobile avec le routage associé (AdMm).

Le tableau 1 regroupe les différentes données utilisées dans les modèles proposées ainsi que les objectifs attendus.

Type de système	Données	Objectifs
AdM central	- Taux d'arrivée des pièces défectueuses. - Caractéristiques des postes.	- Temps moyens de séjour minimum. - Dimension des stocks
AdM mobile	- Capacité de stockage : (η) - Distances inter-sites : ($d_{i, i+1}$) - Durée de remplacement : (τ_p)	- Ordonnancement des tâches. - Dimensionnement des ressources opérateurs et outillage
SdP	- Références équipements - Distance de l'AdMc: (d_{0i})	Durée de remplacement.

Tableau 1 – Récapitulatif des données et objectifs pour chaque type d'atelier

4. Principe de la modélisation modulaire

La décomposition du système en plusieurs modules permet à la fois une meilleure lisibilité et une simplicité dans la phase d'analyse. On s'appuie sur le RdPSGSyI pour modéliser directement le système à partir des différents modules qui le compose selon les étapes suivantes : [SASSINE Ch., 1998]

- 1- Faire une division structurelle du système : un système de n sites de production peut être décomposé à n cellules.
- 2- Un modèle générique est associé à chaque cellule en utilisant RdPSGSyI,
- 3- A chaque cellule, des signaux de synchronisation sont générés : les places lorsqu'elles sont actives envoient des signaux qui conditionnent les transitions qui les reçoivent.

5. Les hypothèses

On s'intéresse à l'application de la maintenance centralisée à un système de production multi-sites comprend un AdM central, plusieurs sites de production et un AdM mobile. Pour évaluer les performances de ce système complexe, nous avons pris certaines hypothèses.

5.1. Hypothèses sur les sites de production

- 1) Tous les SdP sont identiques, utilisent un équipement de caractéristiques identiques.
- 2) Aucune ressource n'est partagée entre la production et les sites de maintenance.
- 3) La défaillance de l'équipement entraîne l'arrêt de production du site.
- 4) La MP est effectuée à la date d'occurrence prédéfinie d'une MP si le SdP est à l'état de repos.

5.2. Au niveau de l'AdM Central

- 1) La réparation d'un équipement défaillant est caractérisée par le temps moyen de réparation μ .
- 2) Dans l'AdM central, il y a toujours un stock suffisant de pièces réparées prêtes à être chargées.

5.3. Au niveau de l'AdM Mobile

- 1) A chaque site, il ne fait qu'un remplacement standard d'un seul type de pièce.
- 2) Lorsque le nombre de pièces en stock est supérieur au niveau du stock sécurité, l'AdM Mobile continue son fonctionnement suivant la planification prédéfinie.
- 3) Lorsque le nombre de pièces en stock est inférieur ou égale au niveau du stock sécurité, l'AdM Mobile suit un des scénarios prédéfini.
- 4) Le temps de séjour dans le site est caractérisé par le temps moyen de remplacement.

6. Les modèles génériques

Le système multi-sites est constitué des différents modèles génériques basés sur les RdPSGSyI.

- Les sites production SdPi : c'est un modèle qui doit tenir compte du fonctionnement interne du site i mais aussi des tâches de maintenance.
- L'atelier de maintenance central (AdMc) : c'est un modèle qui doit prendre en compte du processus complet de réparation ainsi que du taux d'arrivée des pièces défectueuses.
- L'atelier mobile (AdMm) : c'est un modèle qui doit tenir compte de la capacité de stockage de l'AdMm.
- Les politiques de maintenance : c'est un modèle qui doit tenir compte des tâches de maintenance correctives ou préventives
- Le routage : c'est un modèle qui représente la planification des tâches de maintenance de l'AdMm suivant des scénarii bien définis.

6.1. Le modèle des sites de productions

C'est un modèle qui représente les différents modes de fonctionnement du site de production SdP. Il est synchronisé par les événements programmés de maintenance préventive (occurrence d'une maintenance préventive et présence de l'AdMm sur le site) . Le RdPSGSyI de ce modèle (voir figure ??), génère l'ensemble des signaux qui indiquent l'état du site : en production, en état de panne et en arrêt pour maintenance préventive.

La place P1 représente l'état du repos où le SdP est prêt à commencer un de ses modes de fonctionnement. Si aucune MP n'est programmée, l'opération de production peut être lancée (franchissement de T1) avec l'envoi par

la place P2 du signal de début d'usage (*!dus*). L'état de fonctionnement en mode production est représenté par la place P3. Après le temps moyen de service associé à la transition T3, le système revient à sa position de repos en passant par P4 qui envoie le signal (*!fus*) correspondant à la fin du cycle de production.

A l'occurrence d'une la date de MP, le SdP arrête ses cycles de production, il lance celui de MP. La présence de l'AdMm permet le lancement du processus de remplacement (la place P10 envoie un signal de début la MP). La durée de séjour dans cette place P10 dépend du temps moyen de remplacement associé à la transition T12. A la fin de l'opération de remplacement un signal est généré par P11.

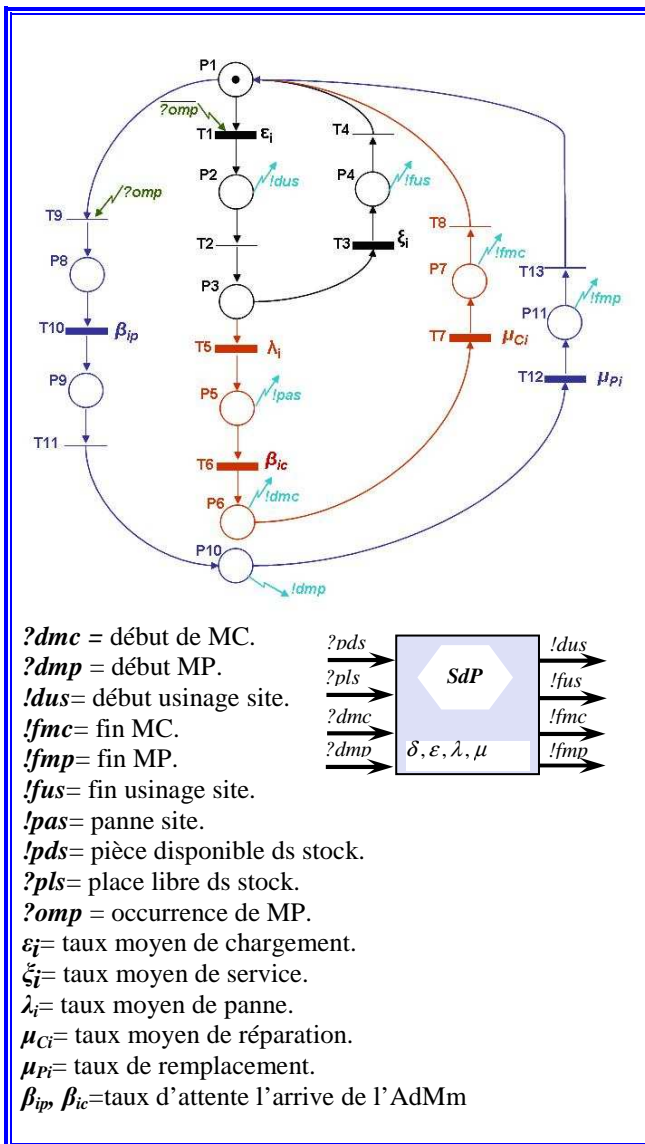


Figure 2. Module de Site de Production

En présence d'une panne, qui ne peut arriver que si le site est en marche, il y a franchissement de la transition T5 avec l'envoi d'un signal par la place P5 (*!pas*) indiquant la présence d'une panne dans le site *i* et le type de panne. Un temps moyen d'attente β_{ic} , est associé à la

transition T6. Il correspond au temps nécessaire à la disponibilité des ressources (pièces neuves dans l'AdMm, outillage et opérateurs), Pendant toute la durée de la maintenance corrective, le signal de début de maintenance corrective (*!dmc*) est émis. La durée de la MC correspond au temps moyen de réparation μ_{ci} associé à la transition T7. Lorsque cette durée est écoulée, un signal de fin de maintenance (*!fmc*) est envoyé.

Le modèle du site de production est constitué de deux cycles représentant les différents modes de fonctionnement du site :

1. En phase de production, il s'agit de la boucle (P1→T1→P2→T2→P3→T3→P4→T4→P1).
2. En phase de maintenance la boucle (T5→P5→T6→P6→T7→P7→T8), s'il s'agit d'une maintenance corrective et en cas de maintenance préventive, c'est la boucle (T9→P8→T10→P9→T11→P10→T12→P11→T1→T3) qui sera réalisée.

Remarque 1 :

On a considéré que la panne n'arrive qu'en cours de fonctionnement, donc pas à l'état de repos.

Remarque 2 :

Les signaux de début et fin de maintenance sont utilisés pour la gestion du stock de l'AdMm.

6.2. Modèle de l'AdMc

Le modèle d'AMc est détaillé dans la thèse de Rosa [Abbou R, 2003]. Il est constitué de plusieurs postes nécessaires à la remise en état d'un équipement défaillant.

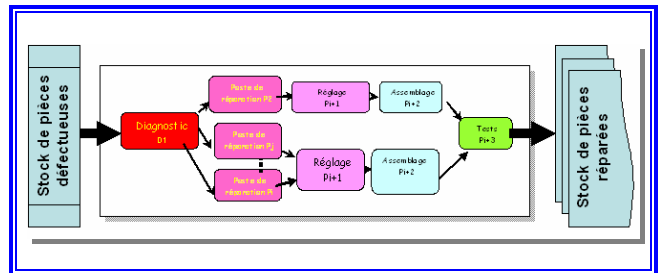


Figure 3. Module de l'AdM central

6.3. Le Stock de l'AdMm

C'est un modèle qui permet de gérer les pièces neuves et défectueuses présentes dans l'AdMm. Il est synchronisé par le modèle représentant les politiques de maintenance.

Le stock de l'AdMm est représenté par un RdPSGSyI avec deux places et deux transitions comme le montre la figure 4.

La place P1 envoie un signal (*!pds*) qui indique qu'il y a au moins une pièce disponible dans le stock. η_j est le

nombre de marques dans la place P1 qui représente la capacité maximale du stock de l'AdMm. La transition T2 est conditionnée par le début d'opération de Maintenance corrective ou préventive. Lorsque T2 est franchie, une pièce neuve est retirée du stock et une place est libérée pour recevoir une pièce défectueuse en envoyant le signal *!pls* à partir de la place P2.

Lorsque le remplacement est fini, suivant que la maintenance soit corrective ou préventive, les signaux *?fmc* ou *?fmp* valident la transition T1.

Le marquage de P1 représente le nombre de pièces en bon fonctionnement (n_b) le marquage de P2 représente le nombre de pièces défectueuses (n_d).

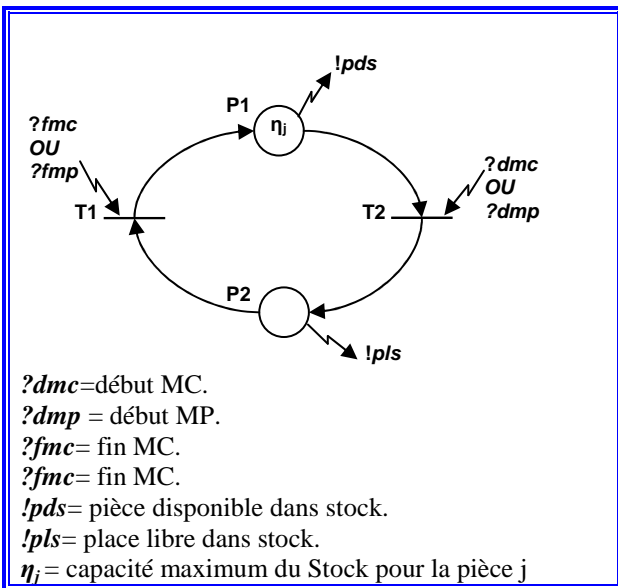


Figure 4. Module de Stock

Remarque 3 :

La non apparition du signal (*pds*, pièce disponible dans stock) traduit le fait que le stock est nul.

Remarque 4 :

Au départ $n_b = n_d$

6.4. Les Politiques de maintenance

Le modèle de RdP comprend deux parties, la politique de MC (AdM central), et la politique de MP (AdM mobile).

6.4.1 Modèle de Maintenance Corrective MC

C'est un modèle constitué de trois places et trois transitions comme le montre la figure 5. Il est synchronisé par l'occurrence aléatoire d'une défaillance émise par le modèle du site de production et par la disponibilité des ressources.

P1 représente l'état de repos de l'équipe de maintenance. La maintenance corrective ne démarre que si une panne a été signalée (*?pas*) et que l'AdMm est présent sur le site (*?asp*). Notons que le signal (*pas*) contient toutes les informations sur le type de panne et le SdP associé.

Pendant toute la durée de réparation un signal est émis par la place P2 signalant le début de la maintenance (*?dmc*). Après un temps moyen de réparation (τ_c) associé à la transition T2, un signal de fin de cette activité (*!fmc*, la fin de la MC) est émis.

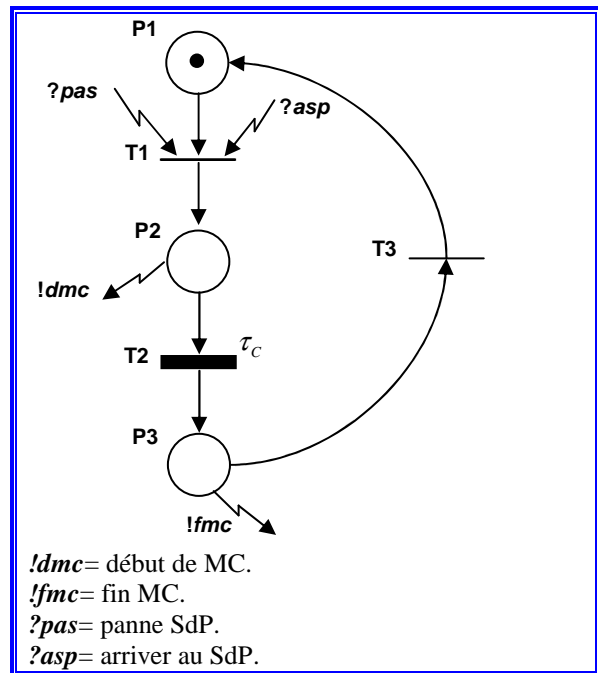


Figure 5. Module de la politique MC

6.4.2 Modèle de Maintenance Préventive MP

Comme pour le modèle de la maintenance corrective, le modèle constitué de trois places et trois transitions comme le montre la figure 6.

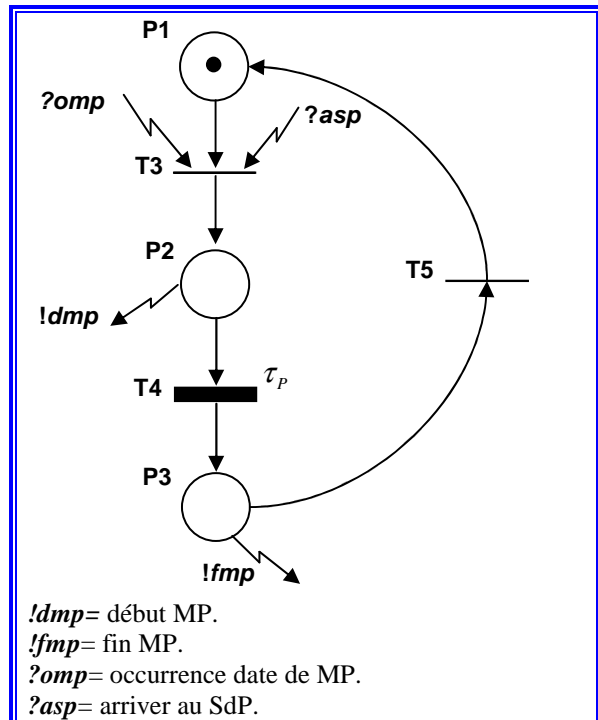


Figure 6. Module de la politique MP

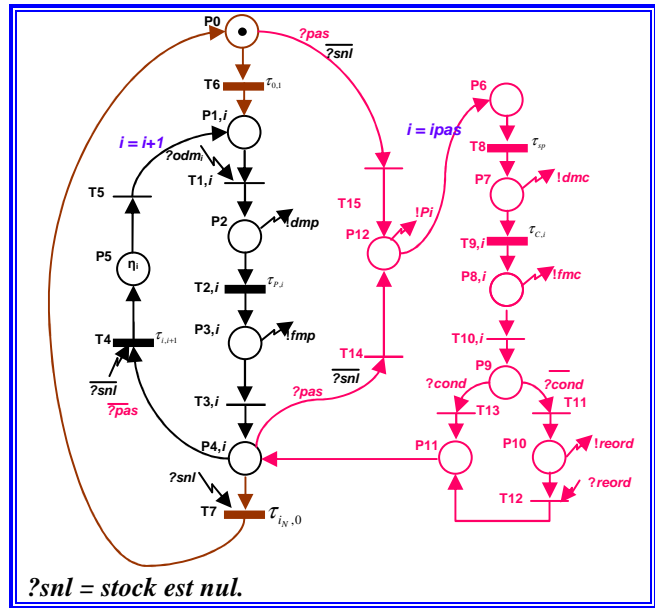
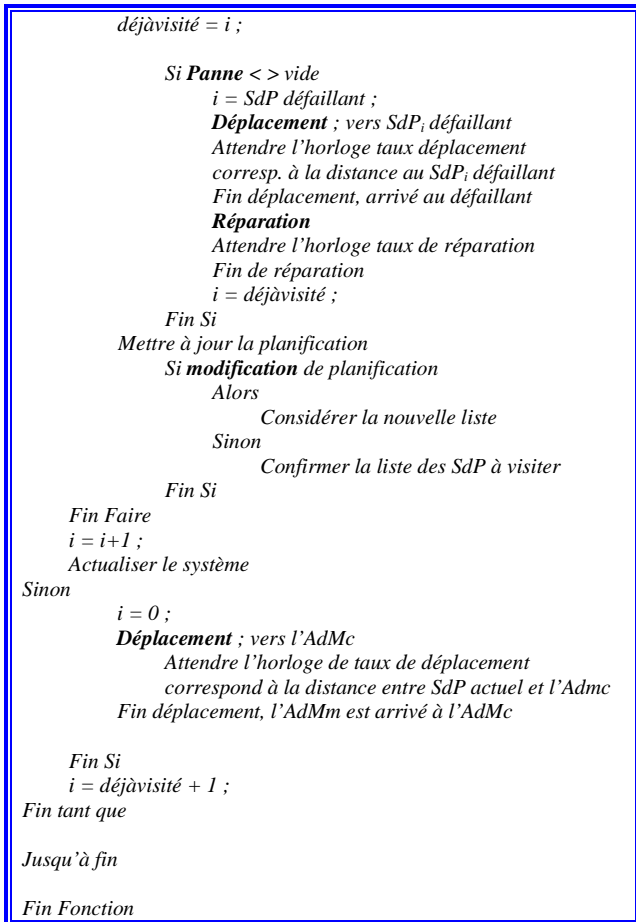


Figure 9. Module du routage de l'AdMm

7. Les modèles de simulation

L'outil le plus adapté pour la simulation des différents modèles proposés est Matlab. En effet, la toolbox Stateflow permet de modéliser et simuler de tels systèmes réactifs complexes. Nous allons limiter la partie simulation à un seul site de production en tenant compte de ses différents modes de fonctionnement. Ainsi, le fonctionnement normal, les arrêts pour maintenance corrective, les arrêts pour maintenance préventive systématique sont modélisés et simulés.

En appliquant l'algorithme ci-dessus, on obtient le modèle la figure 9.

En P0, l'AdMm s'approvisionne à partir de l'AdMc. En l'absence de panne et tant que le niveau du stock est supérieur au seuil (stock de sécurité), le routage s'effectue selon la planification prédéfinie. L'occurrence d'une défaillance est susceptible de nécessiter un réordonnancement des tâches.

Déplacement vers le site de production →
 remplacements de la pièce défectueuse par une neuve →
 En absence de panne, déplacement vers le site suivant si le niveau du stock est supérieur de S_s ...

Si la planification est robuste la présence de l'AdMm au SdP doit correspondre à l'intervalle de temps où le SdP est en état de repos.

Remarque 8 :

Chaque modèle de RdP peut être représenté par une boîte noire avec des entrées/sorties, des signaux de synchronisation associés et les autres paramètres comme les temporisations seront associées au franchissement des transitions.

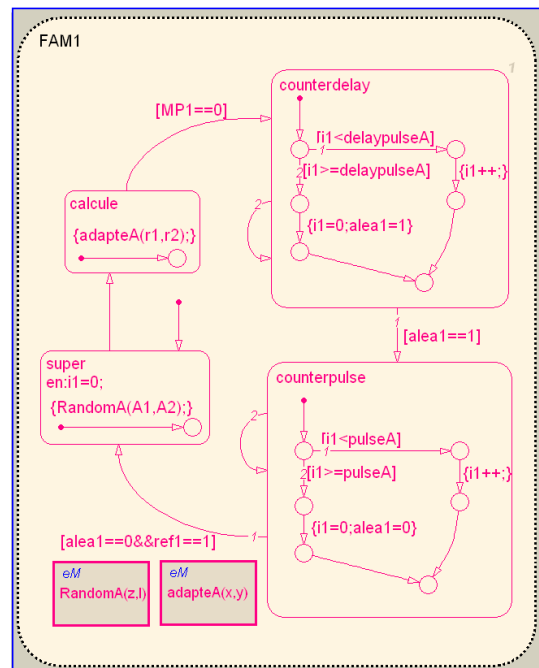


Figure 10. Génération une fonction aléatoire

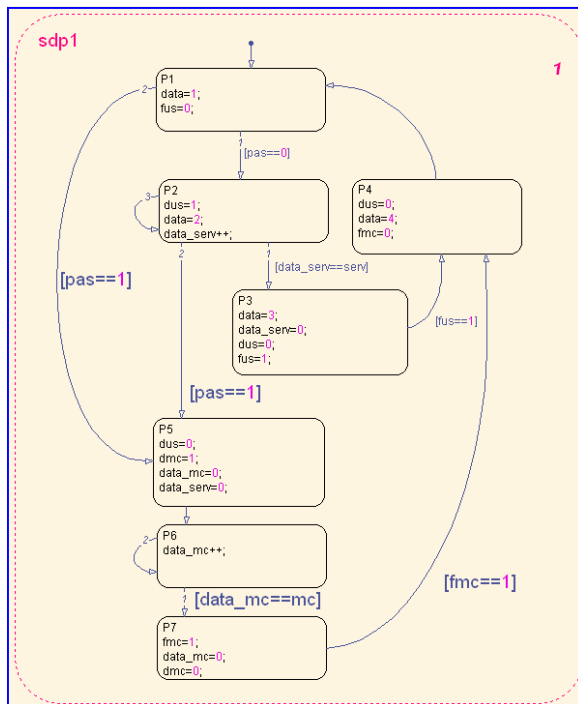


Figure 11. Modèle Simulation des modes de fonctionnement d'un SdP

Pour représenter le comportement du site ainsi que les différents modes de fonctionnement, il est nécessaire de construire certaines fonctions qui génèrent des événements aléatoires comme l'occurrence d'une panne. L'occurrence d'une défaillance entraîne l'arrêt du site en attente de réparation. De plus, la durée de réparation dépend de la panne (on la prendra comme aléatoire), un temps aléatoire est associé à durée de réparation. La figure 10, montre le modèle Stateflow du générateur d'événements aléatoires et la figure 11 le modèle d'un site de production. La simulation par Stateflow permet de calculer le coût global de maintenance et contribue au dimensionnement de la capacité de stockage de l'atelier mobile.

Conclusion

Dans cet article, nous avons proposé une démarche de modélisation pour un système de production multi sites. Le modèle de ce système a été construit sous certaines hypothèses afin de simplifier le nombre de contraintes à prendre en compte. Le modèle basé sur les RdPSGSyI permet de mieux appréhender le processus de maintenance distribuée, qui est le thème principal de cette étude. La simulation des différents ateliers synchronisés (en cours de réalisation) permet d'analyser et d'évaluer les performances de maintenance (taux de défaillances, disponibilité, coût, taux de rendement synthétique...).

Ce travail s'ouvre à plusieurs perspectives. La première est de lever certaines des hypothèses dans la modélisation du système de maintenance distribuée. L'hypothèse 1 concerne les équipements des sites. Dans le modèle proposé un seul type d'équipement est pris en

compte au niveau de chaque site. Cette hypothèse restreint le champ d'action de la maintenance distribuée. Il est nécessaire de tenir compte de la diversité des équipements et l'AdM doit être capable de remettre en état différents types d'équipements. De plus, le remplacement d'un équipement peut engendrer des coûts importants, il est nécessaire alors d'envisager un remplacement multi niveau des équipements. En d'autres termes, il s'agit de prendre en compte le remplacement non pas de l'équipement en entier mais uniquement d'une partie de l'équipement.

REFERENCES

- Abbou R, 2003. *Contribution à la mise en œuvre d'une maintenance centralisée : conception et optimisation d'un atelier de maintenance*. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- Abbou R., Z. Simeu-Abazi, M. Di Mascolo, 2004. *Atelier de maintenance intégré dans un système de production : conception et évaluation des performances*. Journal Européen des Systèmes Automatisés, Volume 38 n°1-2, pp. 197-223.
- ALALI ALHOUIJ A. , SIMEU-ABAZI Z. , ALLA H, 2006. *Ordonnancement Robuste des Tâches de Maintenance Préventive*. MMR'06, Rabat, Maroc.
- Caggiano K. E., J. A.Muckstadt, 2000 *Maintenance Support for the Reusable Launch Vehicle Program: Determining and Evaluating Spare Stock Levels for Recoverable Parts*, Technical report n°1269, School of Operations research and industrial engineering, Cornell University, Ithaca, NY 14853.
- Keizers J., I. Adan, J. van der Wal, 2001. *A Queueing Model for Due Date Control in a Multi server Repair Shop*. Naval Research Logistics, Vol. 48, 2001, pp. 281-292.
- MOLLOY M.K., 1981. *On the integration of delay and throughput measures in processing models*. Thèse de doctorat, university of California, Los Angeles, USA.
- Naktin S., 1980. *Les réseaux de Petri Stochastiques*. Thèse de Doctorat, CNAM, Paris, France.
- Pham D.M, 2005. *Application de la maintenance centralisée pour les systèmes de production multi-sites*. Rapport de master Automatique-Productique, de l'INPG, Grenoble, France.
- Rustenburg J., 2000. *A system approach to budget-constrained spare parts management*, Thèse de doctorat, Eindhoven University of Technology, Pays Bas.
- SASSINE Ch., Simeu-abazi Z., 1998. *Intégration des politiques de maintenance dans les systèmes de production manufacturiers*. Thèse de Doctorat, INPG, Grenoble, France.
- Simeu-Abazi Z., 2007. *Maintenance centralisée pour les systèmes de production multi-sites*, RFGI, revue française de gestion industrielle, vol. n°26.