

MAINTENANCE CENTRALISEE POUR LES SYSTEMES DE PRODUCTION MULTI-SITES

Zineb SIMEU-ABAZI & Maria DI MASCOLO *

Résumé. - Cet article concerne l'application de la démarche d'organisation et de conception d'ateliers de maintenance (AdM) dans un contexte distribué. On s'intéresse plus particulièrement au cas où l'on dispose, d'une part, d'un AdM Central dans lequel les cycles de réparation sont effectués et, d'autre part, d'un AdM Mobile qui peut intervenir pour faire des remplacements sur plusieurs sites suivant une planification prédéfinie. Il s'agit alors de dimensionner les ressources : les pièces de rechange pour l'ensemble des AdM mais aussi les opérateurs de maintenance. Des modèles basés sur les machines à états finis sont proposés pour différents types d'ateliers de maintenance (Mobile et Central). Une étude de coût et une analyse de l'apport de la maintenance centralisée dans le cas d'une structure multi-sites sont proposées.

Mots-clés : Maintenance distribuée, gestion des ressources, machine à états finis, analyse de performance, évaluation des coûts.

1. Introduction

La fonction maintenance est communément associée au processus de réparation qui correspond à un ensemble d'actions à effectuer sur un équipement défectueux. Il s'agit des actions de diagnostic, d'identification, de localisation, de test pour la remise en état de cet équipement (Monchy, 2000). Les exigences au niveau sûreté de fonctionnement des systèmes conduisent à transférer sur la fonction maintenance, la responsabilité de garantir la disponibilité

* Laboratoire G-SCOP : Grenoble-Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production - 46, Avenue Félix Viallet, 38031 Grenoble cedex 1, Zineb.Simeu-Abazi@inpg.fr , Maria.Di-Mascolo@inpg.fr.

de tels systèmes. Ces exigences qui se traduisent en termes de coût, conduisent à proposer des solutions permettant de minimiser la durée d'indisponibilité des équipements.

Les actions qui permettent d'améliorer la disponibilité des équipements peuvent se situer aussi bien au niveau du processus de réparation (diagnostic, réparation, test,...) qu'au niveau de la gestion des ressources (pièces de rechange ou réparateurs). Dans les deux cas, l'amélioration de la disponibilité des équipements passe par une gestion efficace et robuste des tâches de maintenance et un dimensionnement adéquat des pièces de rechange.

Dans les domaines d'activité, comme l'aéronautique ou le naval, où la disponibilité des équipements est primordiale, s'est développée la notion d'Atelier de Maintenance (AdM) (Rustenburg, 2000). Un atelier central prend en charge la réparation des équipements venant de divers sites. Il est dédié aux processus de réparation mais aussi aux actions préventives. En effet, afin de réduire l'occurrence des défaillances, l'AdM assure le suivi en temps réel de l'état des équipements des différents sites. Des interventions régulières (maintenance préventive) sont programmées selon un échéancier préétabli avec des ressources issues de cet AdM. Les activités de maintenance sont donc réalisées par deux structures:

- une structure qui réalise le processus de réparation : l'AdM Central ;
- une structure qui effectue des inspections et remplacements : l'AdM Mobile.

La figure 1 représente le contexte de l'étude et met en évidence les relations entre les différents sites. De ce fait, ce contexte distribué nécessite le développement de nouvelles techniques d'ordonnement des tâches de maintenance préventive et de dimensionnement des ressources.

Des travaux de recherche 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). Toujours dans le domaine naval, Keizers et al. (2001) ont proposé un modèle, utilisant les réseaux de files d'attente, pour calculer la probabilité de réaliser une réparation avant une date limite dans un AdM multiserveurs. Lau et al., (2006) ont étudié des systèmes comportant un certain nombre de sous équipements remplaçables (LRU). Ils se sont intéressés à l'effet de la passivation (tous les LRU sont arrêtés si l'un d'entre eux est en réparation) sur la disponibilité du système. D'autres travaux ont porté sur 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).

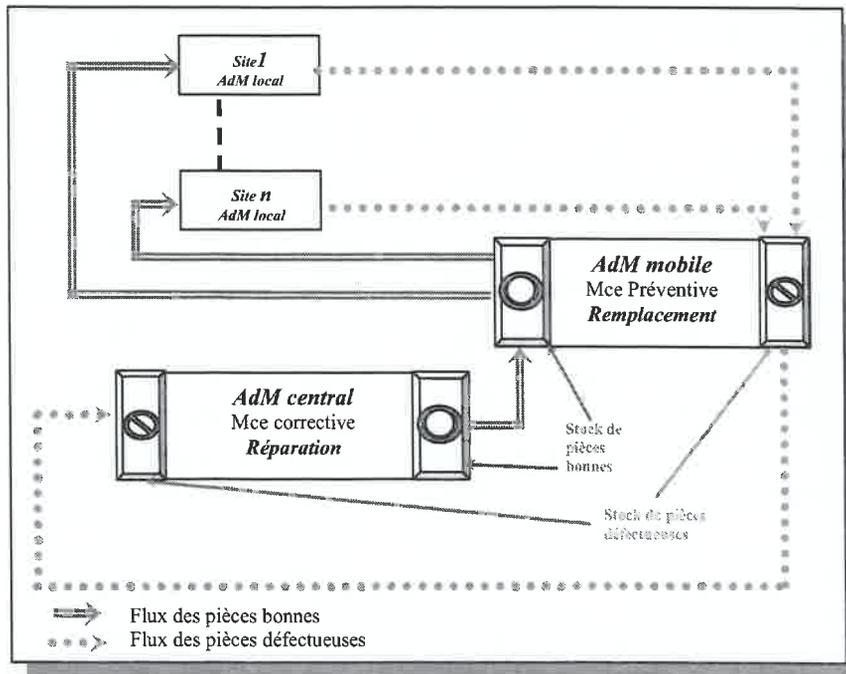


Figure 1 : Relations entre les différents sites de production et les ateliers de maintenance.

Cet article concerne l'application de la démarche de conception d'AdM dans un contexte distribué. On 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. Il s'agit alors de dimensionner les ressources (pièces de rechange dans les AdM fixes ou Mobile et les opérateurs de maintenance). Une analyse de l'apport de la maintenance centralisée dans le cas d'une structure multi-sites est proposée ainsi qu'une évaluation des coûts. Pour une politique cyclique de gestion des pièces de rechange, le but est de minimiser le coût moyen par un bon dimensionnement des pièces dans l'atelier mobile et une politique d'inspection adéquate de l'atelier mobile.

Après une présentation succincte du cadre de travail, des généralités sur la maintenance et plus particulièrement la maintenance multi-sites sont présentées. La conception d'un atelier de maintenance et l'organisation générale des sites de réparation sont ensuite abordées. Une modélisation des ateliers de maintenance (Central et Mobile) est enfin proposée, à travers un cas d'étude, et les résultats de simulation obtenus sont présentés. Une discussion autour des résultats obtenus terminera cet article.

2. Description du problème

2.1 Politiques de maintenance

L'amélioration de la disponibilité des équipements de production dans le contexte de maintenance distribuée, nécessite l'intégration conjointe de la maintenance corrective et de la maintenance préventive. Les actions correctives sont affectées à l'AdM Central. Le problème à résoudre est alors de concevoir l'architecture de l'AdM (cycle de réparation), de dimensionner les pièces de rechange et l'outillage pour un budget donné. Des travaux sur ce sujet ont fait l'objet de différentes publications. Leur objectif est l'optimisation des coûts et la minimisation du temps de séjour des pièces défectueuses dans l'atelier de maintenance central (thèse Abbou 2003). Les actions préventives sont affectées à l'AdM Mobile et aux AdM locaux. Concernant l'AdM Mobile, il faut alors planifier les tâches de maintenance préventives (cycle des visites sur les sites de production), dimensionner la zone de stockage de l'atelier mobile et évaluer les coûts de maintenance. Pour les AdM locaux, enfin, les actions de maintenance se réduisent à des inspections régulières des équipements de production

Actuellement, dans une logique de TPM (Total Productive Maintenance), trois niveaux de maintenance sont définis :

- *Niveau I* : réglage simple ou réparation standard par les opérateurs ou les techniciens sur place avec des outillages légers et standard.
- *Niveau II* : activités complexes (diagnostic, identification des origines de pannes...) ou travaux importants de maintenance corrective et préventive par des techniciens spécialisés et experts avec des outillages lourds et spécialisés.
- *Niveau III* : activités externalisées.

Le tableau 1, récapitule les affectations des différentes actions de maintenance. Ainsi, les AdM locaux se trouvent au niveau I et l'AdM Central est chargé du niveau II. Par ailleurs, l'AdM Mobile sert à la maintenance préventive ou aux cas d'urgence lorsque le support de l'AdM Central aux AdM locaux est impossible.

Sites	Niveau
AdM Mobile	I Remplacement
AdM Central	II
AdM local Site de production	I Inspection

Tableau 1 : Niveau de maintenance de chaque site.

2.2 Maintenance centralisée

Une maintenance centralisée permet d'assurer la cohérence de l'ensemble des activités de maintenance entre les sites de production dispersés géographiquement et l'atelier central. Cette approche est inspirée de l'approche d'une maintenance intégrée.

Afin de réduire la probabilité d'occurrence des défaillances et d'augmenter le cycle de vie des équipements, des interventions régulières sont programmées sur chaque site de production (maintenance préventive systématique). La mission de l'AdM Mobile est alors de prévenir et d'empêcher l'interruption des opérations, et de maintenir l'équipement dans un état tel qu'il puisse opérer le plus longtemps possible avec des coûts d'intervention des plus faibles.

La figure 2 montre une configuration des relations entre les ateliers de maintenance (AdM central et AdM Mobile) et les sites de production. Sachant que ces AdM ne correspondent pas aux mêmes niveaux de maintenance, il est nécessaire de prendre en compte la spécificité de chaque site lors de la modélisation. L'AdM Mobile assure les actions de maintenance préventives alors que l'AdM Central assure les actions de maintenance correctives.

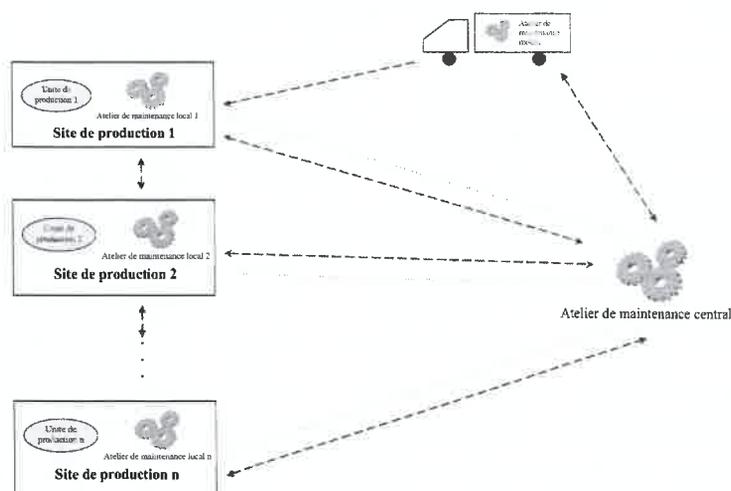


Figure 2 : Illustration schéma global (Atelier Central + Mobile + Sites de production).

2.2.1 Rôle de chaque site

Nous définissons un atelier de maintenance central (AdM Central) comme un ensemble de ressources (techniciens, postes d'intervention, outillage, pièces de rechange) destinées à garantir la pérennité des équipements (Abbou, 2003). Son rôle est de détecter l'origine des défaillances sur un équipement défectueux et de rétablir son fonctionnement (maintenance corrective).

2.2.2 Organisation de l'atelier de maintenance central

Dans un contexte multi-sites, le fait de centraliser la maintenance en concevant deux AdM l'un central et l'autre mobile, permet d'assurer une bonne productivité tout en minimisant le nombre de ressources. Ainsi, il faut réaliser un compromis entre la disponibilité et l'efficacité des équipements à améliorer, le coût global de possession des équipements à réduire et les coûts des activités de maintenance à optimiser. Le cycle de réparation d'un équipement défaillant est illustré par la Figure 3. Différents postes d'intervention sont alors à définir suivant la classe de la défaillance et la probabilité d'occurrence.

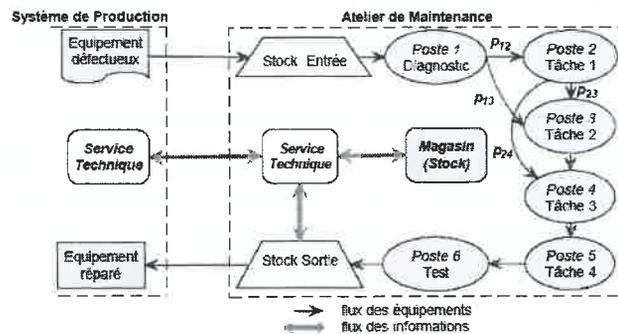


Figure 3 : Cycle de réparation d'un équipement défectueux dans un AdM Central

Comme l'atelier de maintenance central est destiné à rétablir le fonctionnement des équipements défectueux, il est nécessaire de détailler les différentes phases de réparation de tout équipement défectueux. Le processus de déroulement d'une maintenance corrective de tout équipement peut être schématisé par la figure 4. On remarque que depuis la date effective t_0 d'une défaillance jusqu'à la date de l'intervention t_5 , la durée $[t_0, t_5]$ est consacrée à la détection, la localisation, le diagnostic et la préparation de la remise en état. L'intervalle $[t_0...t_7]$ dans la maintenance corrective, qui est le moment d'indisponibilité, dépend de la capacité à identifier les défaillances (capteurs), du niveau des techniciens, des ressources, des infrastructures (GMAO Gestion de Maintenance Assisté par Ordinateur)... De plus, pour réduire considérablement ce moment, on peut aussi utiliser la technique de réparation par remplacement.

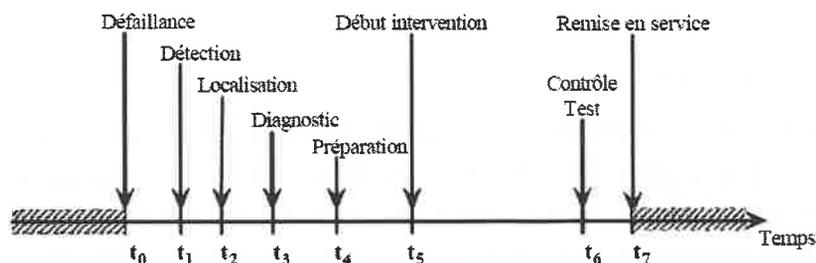


Figure 4 : Processus de déroulement d'une maintenance corrective d'un équipement.

Pour améliorer la productivité, c'est cette durée qu'il faudra minimiser par une gestion efficace des ressources de l'AdM et une analyse du retour d'expérience du programme de maintenance. Dans des travaux précédents [Abbou 2003], nous avons proposé une structure d'AdM Central garantissant une durée de séjour minimale de l'équipement défectueux. Ces travaux reposent sur l'utilisation des réseaux de files d'attente pour évaluer les performances de différentes configurations d'AdM.

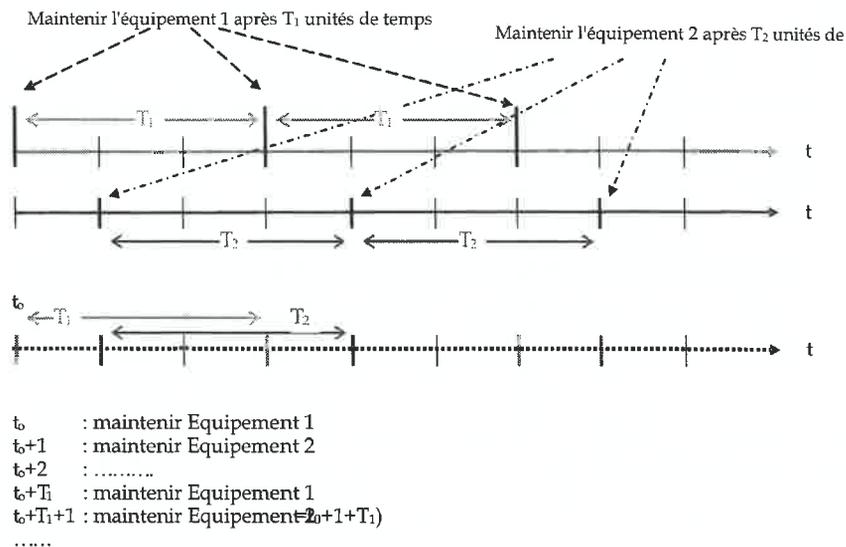


Figure 5 : Processus cyclique de déroulement d'une maintenance préventive d'un équipement.

2.2.3 Organisation de l'atelier de maintenance mobile

La maintenance préventive est réalisée selon un échéancier prédéfini. Elle intervient en l'absence de défaillance.

Ces actions de maintenance préventives permettent ainsi d'augmenter la disponibilité des équipements, surtout dans les secteurs à risque comme l'armée, les centrales nucléaires, l'aérospatial... Les périodicités de maintenance sont calculées préalablement en tenant compte de l'environnement de fonctionnement de l'équipement ainsi que d'autres caractéristiques constructeur, le MTBF (Mean Time Between Failure), MTTF (Mean Time To Failure).

Cette technique consiste à remplacer, selon la disponibilité dans le stock de l'AdM, l'équipement - ou une partie de l'équipement qu'on nomme *pièce* - défectueux(se) par un autre équipement - ou une autre pièce - équivalent(e), réparé(e) ou neuf(ve), en entamant parallèlement la réparation. Ces équipements et pièces de rechange doivent être approvisionnés et mis dans le stock afin de répondre rapidement aux pannes soudaines des équipements.

Notons que lorsqu'on utilise cette technique, la disponibilité d'un équipement est optimisée s'il y a suffisamment d'équipements et de pièces de rechange dans le stock, avec un coût d'approvisionnement correspondant.

On cherche donc à déterminer un dimensionnement optimal des équipements et des pièces à stocker, en fonction de la disponibilité requise des machines et du budget associé.

2.3 Cas d'étude

On s'intéresse ici plus particulièrement à l'application de la maintenance centralisée à un système de production multi-sites pour lequel l'AdM Mobile est dédié au traitement de la maintenance préventive (on ne prend pas en compte le cas de maintenance corrective) par la technique de remplacement.

Le système de production multi-sites que nous allons étudier comprend un AdM Central, trois sites de production et un AdM Mobile. Vue la complexité d'un système multi-sites, on propose certaines hypothèses et trois scénarii pour simplifier le cas d'étude.

Cette étude permet d'évaluer des indicateurs de performance, dont le coût de la maintenance dans ce contexte multi-sites.

2.3.1 Les hypothèses

Au niveau des sites de production :

- Chaque site de production possède un équipement unique.
- Les équipements sont identiques dans les trois sites.
- Les distances entre l'AdM Central et les sites sont classées par ordre de distance croissante: $d_{01} < d_{02} < d_{03}$.

Au niveau de l'AdM Central :

- La réparation d'un équipement défaillant venant de l'AdM Mobile est caractérisée par un temps de réparation moyen d'un équipement défaillant. Ainsi, la durée globale de réparation est proportionnelle au nombre d'équipements défaillants se trouvant dans l'AdM mobile.

Au niveau de l'AdM Mobile :

- Lorsque le niveau de stock de pièces de rechange de l'AdM mobile est supérieur à un seuil fixé, il va visiter les sites selon l'ordre (Site 1 → Site 2 → Site 3).
- Une fois que le niveau du stock est inférieur ou égal à ce seuil, il va suivre un des trois scénarii proposés plus loin.
- A chaque site, il ne fait qu'un remplacement en vue d'augmenter la disponibilité du site.
- Le remplacement est assuré quel que soit l'état de l'équipement.
- Le stock est réapprovisionné lors du retour de l'AdM Mobile à l'AdM Central.
- Le temps d'attente à l'AdM Central est le produit du nombre de pièces défectueuses ramenées par l'AdM Mobile par le temps de réparation moyen d'un équipement défectueux à l'AdM Central.

2.3.2 Scénarii proposés

Scénario 1 : le retour de l'AdM Mobile vers l'AdM Central n'est effectué que lorsque le stock de pièces est vide.

Scénario 2 : après un remplacement sur site, si le stock de l'AdM Mobile est de 2 pièces, trois parcours sont possibles en fonction du site où il se trouve. S'il est :

- Au site 1, il va retourner tout de suite vers l'AdM Central, (Site 1 → AdM Central).
- Au site 2, il va suivre le parcours (Site 2 → Site 3 → Site 1 → AdM Central).
- Au site 3, il va suivre le parcours (Site 3 → Site 1 → AdM Central).

Scénario 3 : après un remplacement sur site, si le stock de l'AdM Mobile est de 2 pièces, trois options sont possibles en fonction du site où il se trouve. S'il est :

- Au site 1, il va retourner tout de suite vers l'AdM Central (Site 1 → AdM Central).
- Au site 2, il va calculer le coût de déplacement et choisir le coût minimum correspondant soit au parcours (Site 2 → AdM Central), soit au parcours (Site 2 → Site 3 → Site 1 → AdM Central).

- Au site 3, il va calculer le coût de déplacement et choisir le coût minimum correspondant soit au parcours (Site 3 → AdM Central) soit au parcours (Site 3 → Site 1 → AdM Central).

2.3.3 Les indicateurs

Notre étude doit permettre de dimensionner les ressources et de mettre en évidence l'apport de la maintenance centralisée dans le cas d'une structure multi-sites. Sachant que l'objectif principal de ce cas d'étude est d'augmenter la disponibilité de ce système de production multi-sites et de minimiser le coût de maintenance préventive, on calcule :

- le coût de maintenance préventive = (coût de déplacement + coût de stock + coût de la pièce remplacée).
- un indicateur d'efficacité qui correspond au rapport entre le nombre de cycles que l'AdM Mobile peut réaliser et le nombre de tours idéal. Ce nombre de tours idéal est le nombre total de parcours (Site 1 → Site 2 → Site 3) que l'AdM Mobile peut réaliser quand le stock est infini (c'est-à-dire quand l'AdM Mobile ne doit pas consacrer de temps à retourner vers l'AdM Central pour remplir le stock). La valeur maximale (idéale) de cet indicateur est 1.

$$\text{efficacité} = \frac{\text{Nombre de cycles effectués}}{\text{Nombre idéal de cycles}}$$

Les objectifs fixés sont récapitulés dans le tableau 2.

Type de système	Données	Objectifs
AdM Central	- Taux d'arrivée des pièces défectueuses - Caractéristiques des postes	- Temps moyen de séjour minimum - Dimension des stocks pour un budget donné qui se traduit en termes de coût comme suit : $\sum (C_{r,o}(S_i)) \leq B_c$ Où $C_{r,o}$: coût de la pièce de rechange i et opérateur B_c : budget affecté à l'atelier central S_i : nombre de pièces de rechange de type i
AdM Mobile	- Capacité de stockage : c_m - Distances inter-sites : d_{ij} - Durée de remplacement : T_r	Ordonnement des tâches Dimensionnement des ressources opérateurs et outillage $\sum (C_d(\text{Site}_i)) \leq B_m$ Où C_d : coût de déplacement vers le site i B_m : budget affecté à l'atelier mobile
AdM local	- Références équipements - Distance de l'AdM Central: d_{0j}	Durée de remplacement Indicateur d'efficacité : $\frac{\text{nombre de cycles effectués}}{\text{nombre de cycles idéal}} \rightarrow 1_c$

Tableau 2 : Récapitulatif des données et objectifs pour chaque type d'atelier de maintenance.

Enfin, à partir des résultats obtenus pour ces trois scénarii proposés, on choisit le scénario qui donne la meilleure disponibilité avec un coût de maintenance minimal et un indicateur d'efficacité maximal (plus proche de 1).

3. Simulation et analyse des résultats

3.1 *Modèle de simulation*

Pour la simulation du système nous avons utilisé l'outil StateFlow de Matlab, qui permet de programmer et simuler des machines à états finis sous un environnement graphique.

Les différents états du processus de maintenance préventive peuvent se modéliser par des blocs d'états illustrés par la figure 7.

Le bloc « AdM Mobile » permet de décrire les états possibles de l'AdM Mobile : initial, déplacement entre les sites, remplacement, actualisation du stock et choix de la prochaine destination (AdM Central ou autre site), déplacement vers l'AdM Central, réapprovisionnement du stock de l'AdM Mobile, choix du site à visiter après l'AdM Central.

La figure 6 donne le modèle correspondant au fonctionnement de l'AdM Mobile. Le bloc « ordre de visites » permet de déterminer les parcours de l'AdM Mobile (valeur du seuil du stock pour retourner à l'AdM Central, détermination du prochain site à visiter). Le bloc « AdM Central et sites » permet de visualiser la situation courante de l'AdM Mobile (dans un site ou à l'AdM Central). Il y a aussi trois autres blocs qui permettent de :

- calculer le coût du déplacement de l'AdM Mobile
- calculer le coût du stock pris par l'AdM Mobile
- calculer le nombre de tours que l'AdM Mobile peut faire lorsqu'on suppose que le stock sur l'AdM Mobile est infini.

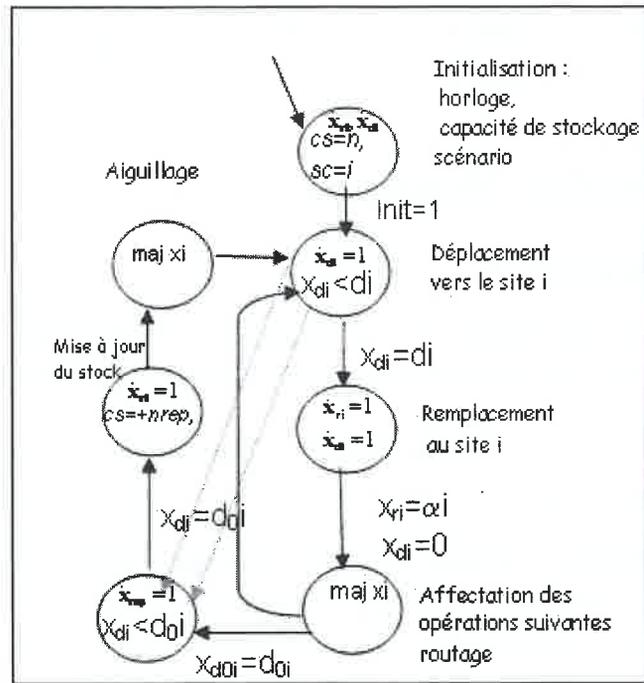


Figure 6 : Modèle automate de l'AdM Mobile.

Dans chaque bloc d'état actif, les activités programmées pilotent l'évolution du processus correspondant à cet état. On fait évoluer le processus par synchronisation avec un générateur de pulse. Tous les blocs de la figure 7 entourés d'une ligne pointillée, sont des blocs d'états parallèles, c'est-à-dire qu'ils sont tous traités après chaque pulse du générateur. Par contre, les sous-blocs (cadres en ligne continue) sont des blocs en série. A chaque pulse il y a seulement un bloc actif parmi ces sous-blocs.

Les simulations ont été effectuées sur une durée de 1000 unités de temps, pour différentes valeurs des paramètres. On obtient les résultats présentés dans le paragraphe suivant.

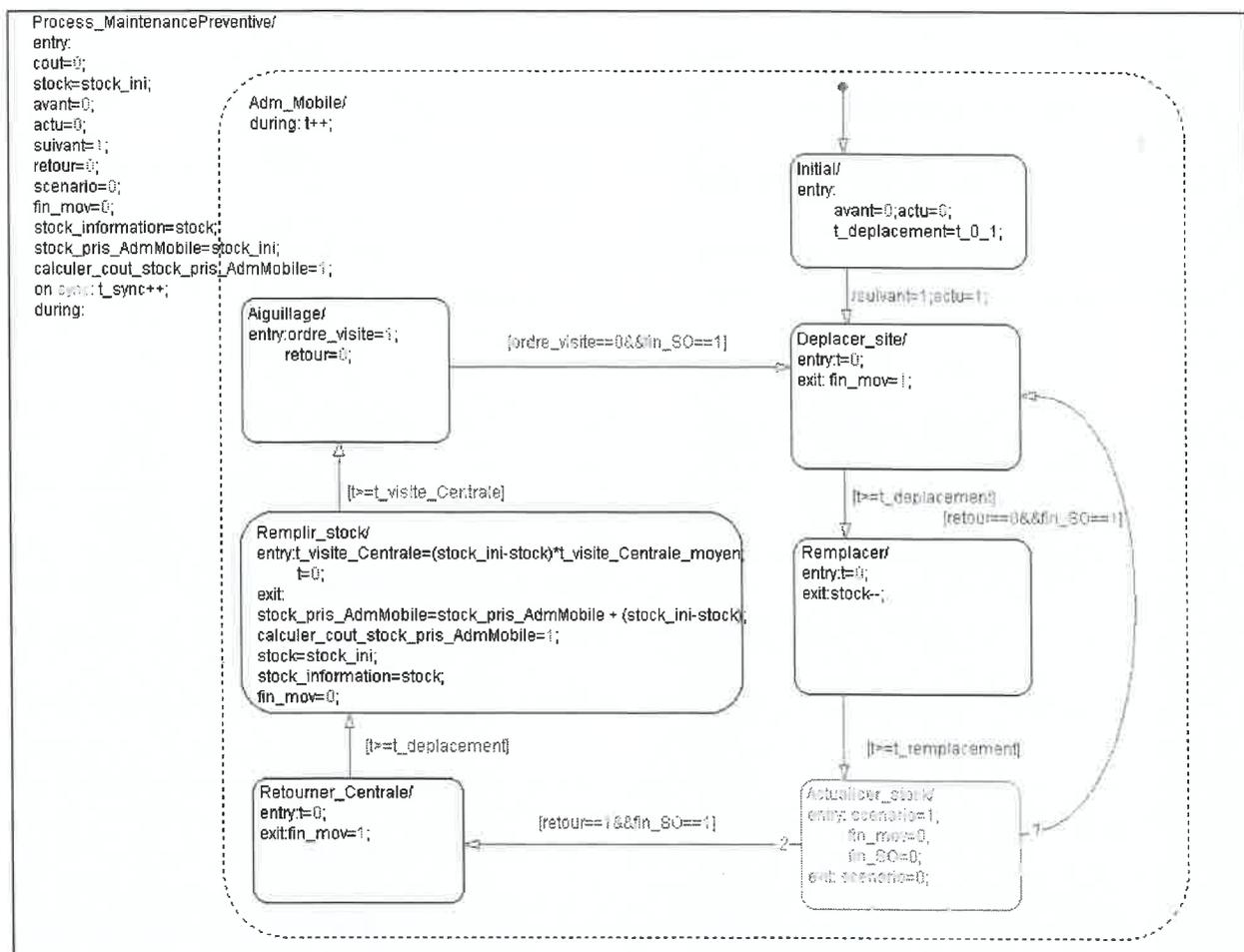


Figure 7 : Schéma global des blocs d'états du processus de maintenance préventive dans un système de production multi-sites - Représentation des automates temporisés par « Stateflow ».

3.2 Résultats de simulation

Rappelons que dans la configuration étudiée, l'atelier central de maintenance est le lieu où se déroule le processus de réparation. Cet atelier alimente en pièces de rechange l'atelier mobile dont le rôle est limité au remplacement d'équipements usés au niveau de chacun des trois sites. Pour un ordonnancement prévisionnel donné, l'objectif est de déterminer la meilleure politique de remplacement à appliquer. Trois scénarii ont été définis au paragraphe 2.3.

Les paramètres qui interviennent dans le calcul du coût de maintenance sont :

- les coûts de déplacements entre l'atelier central et les sites ainsi que les déplacements inter sites

- les coûts de réparation
- les coûts de stockage
- le coût des pièces de rechange.

La simulation effectuée concerne la configuration donnée par le tableau 3. Le paramètre d_{ij} représente la distance entre le site i et le site j . Notons que l'on a $d_{ij} = d_{ji}$.

La distance entre l'AdM Central et le site i est noté : d_{ci} .

	<i>Atelier Central</i>	<i>Site 1</i>	<i>Site 2</i>	<i>Site3</i>
<i>Atelier Central</i>		10	50	90
<i>Site 1</i>	10		d_{12}	d_{13}
<i>Site 2</i>	50	d_{12}		d_{23}
<i>Site 3</i>	90	d_{13}	d_{23}	

Tableau 3. Distances en km de la configuration étudiée.

Dans cette configuration à trois sites les distances inter-sites obéissent à la règle suivante :

$$\text{si } d_{ij} = \text{Max} (d_{12}, d_{13}, d_{23}) \text{ alors } d_{ij} < \sum_{kl \neq ij} d_{kl}$$

Chaque site a son propre cycle de maintenance (Site1, T_1), (Site2, T_2), (Site3, T_3) prédéfini, le temps de déplacement étant inclus. L'ordonnancement des tâches de l'AdM Mobile est réalisé en fonction de ces temps de cycle incluant le temps de déplacement et le temps de réparation (remplacement).

Lors de la visite à chaque site, l'AdM Mobile dont le taux d'arrivée à un site i est λ_i remplace l'équipement défectueux de ce site par un nouvel équipement en un temps de remplacement supposé nul. Après ce remplacement, le stock actuel de l'AdM Mobile est décrémenté d'une unité. A chaque remplacement, le niveau du stock est comparé au seuil préalablement fixé suivant le scénario appliqué. Si le niveau de stock atteint ce seuil, l'AdM Mobile retourne vers l'AdM Central pour, d'une part, déposer les équipements défectueux, et, d'autre part, se réapprovisionner. La quantité des nouveaux équipements à prendre est égale à la quantité utilisée pour le remplacement.

Le temps d'attente (noté t_{att}) de l'AdM Mobile à l'atelier Central, correspond au temps moyen de réparation des équipements défectueux. On note n_{def} (resp. n_{bon}) le nombre d'équipements (resp. le nombre d'équipements bons ou réparés). Alors ce temps d'attente peut s'exprimer suivant la formule suivante :

$t_{att} = (1/\mu) \cdot n_{def}$; μ étant le taux moyen de réparation.

La capacité de stockage de l'AdM Mobile est notée n_{init} . Après avoir effectué un nombre maximum de cycles, l'AdM Mobile retourne avec n_{def} équipements défectueux et $(n_{init}-n_{def})$ équipements bons en stock à l'atelier central pour se réapprovisionner d'un nombre d'équipements égal à n_{def} .

$n_{def} = n_{bon}$; sachant qu'il reste encore $(n_{init}-n_{def})$ équipements dans l'atelier mobile non utilisés.

Ces différents paramètres sont pris en compte dans le calcul du prix de la maintenance. Sur les trois scénarii proposés, nous allons étudier l'influence de la capacité de stockage de l'AdM Mobile (n_{init}) et l'influence des distances inter sites (d_{ij}) qui sont, selon nous, les paramètres principaux intervenant dans le calcul des coûts.

3.2.1 Influence de n_{init} .

Les résultats de la courbe 1 sont obtenus pour les valeurs suivantes de distances entre l'AdM Central et le site :

$$d_{c1} = 10 \text{ km}$$

$$d_{c2} = 50 \text{ km}$$

$$d_{c3} = 90 \text{ km}$$

et les distances inter sites suivantes :

$$d_{12} = 35 \text{ km}$$

$$d_{23} = 45 \text{ km}$$

$$d_{13} = 85 \text{ km}$$

Nous remarquons que pour les paramètres de coût utilisés et les distances choisies pour notre cas d'étude, les scénarii sont équivalents à partir d'une capacité de stockage de 20 pièces. Les coûts qui augmentent ne sont liés qu'aux coûts de stockage des pièces. Ce résultat s'explique par le fait qu'à partir d'une capacité de stockage donnée, les coûts de transport sont absorbés par le coût des pièces de rechange. En effet, les scénarii proposés visent à minimiser les déplacements entre l'AdM Mobile et l'AdM Central. Lorsque la capacité de stockage est importante, le coût lié aux déplacements devient négligeable devant l'investissement important en pièces.

On peut également dire que ce résultat permet le dimensionnement du stock de l'AdM Mobile pour un budget limité. En effet, si le budget est limité à 3 000€, seul un stock de 20 pièces permet d'atteindre cet objectif.

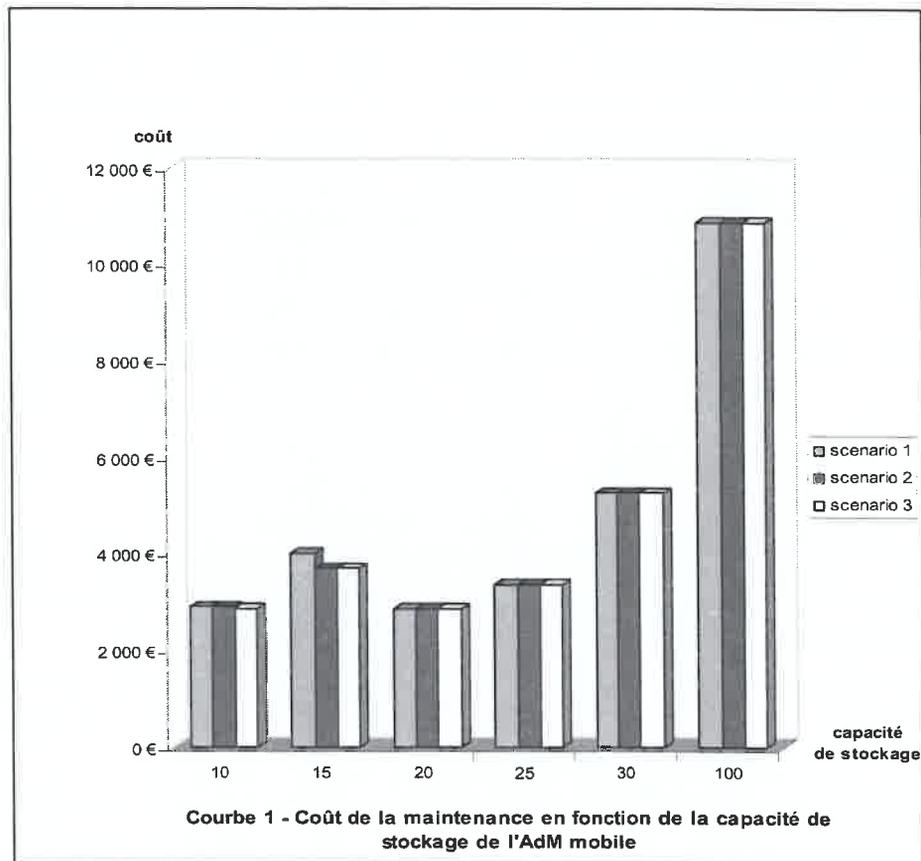
3.2.2 Influence de d_{ij} .

Le tableau 4 représente quelques uns des résultats significatifs obtenus pour une simulation de 1000ut (d'autres résultats peuvent être trouvés dans Pham 2005). Les distances entre l'AdM Central et le site sont celles données dans le tableau 1. La capacité de stockage de l'AdM Mobile est égale à 10 pièces.

Distance Inter-sites (km)	Coût cumulé scénario 1 (€)	Coût cumulé scénario 2 (€)	Coût cumulé scénario 3 (€)
$d_{12} = 5$ $d_{23} = 7$ $d_{13} = 10$	1 209	1 165	1 167
$d_{12} = 35$ $d_{23} = 45$ $d_{13} = 75$	2 930	2 870	2 530
$d_{12} = 35$ $d_{23} = 45$ $d_{13} = 85$	2 910	2 800	2 485

Tableau 4 : Coût cumulé pour les différents scénarii en fonction des distances inter sites.

Sur un nombre important de simulations effectuées, les résultats confirment que le coût de la maintenance dépend non seulement de la capacité de stockage de l'atelier mobile (courbe 1) mais aussi des distances inter sites (tableau 4). En effet, lorsque les distances inter sites sont identiques les différents scénarii sont équivalents. Par contre si les distances inter sites sont différentes, c'est le scénario 3 qui est plus performant en termes de coût.



4. Conclusion

Dans cet article, nous avons proposé une démarche de modélisation et d'analyse des coûts de maintenance préventive 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. Nous avons notamment supposé que tous les sites ont le même équipement. Le modèle et les résultats de simulation sous StateFlow de Matlab permettent de mieux comprendre le processus de maintenance ainsi que le secteur de maintenance industrielle et, plus particulièrement, la maintenance distribuée qui est le thème principal de cette étude.

Ce travail s'ouvre à plusieurs perspectives. La première est d'intégrer les actions correctives dans la modélisation du système de maintenance distribuée. De ce fait, un modèle global du processus maintenance centralisée préventive et corrective permet d'analyser et d'évaluer les performances de maintenance (taux de défaillance, disponibilité, coût, taux de rendement synthétique...).

La seconde concerne les équipements des sites. 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.

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'équipement. C'est la troisième perspective que nous comptons développer.

5. Bibliographie

- 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.
- 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.
- Lau H. C., H. Song, C. T. See, S. Y. Cheng, 2006. Evaluation of time-varying availability in multi-echelon spare parts systems with passivation. *European Journal of Operational Research*, Volume 170, Issue 1, 1 April 2006, Pages 91-105.
- Monchy F., 2000. Maintenance: Méthode et Organisations, Editions DUNOD
- 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.
- Pham D.M, 2005. Application de la maintenance centralisée pour les systèmes de production multi-sites. Rapport de master Automatique-Productique, de l'INPG.
- Rustenburg J., 2000. A system approach to budget-constrained spare parts management, Thèse de doctorat, Eindhoven University of Technology, Pays Bas.