



HAL
open science

Contribution à l'optimisation de la maintenance dans un contexte distribué

Ahmad Alali Alhouaij

► **To cite this version:**

Ahmad Alali Alhouaij. Contribution à l'optimisation de la maintenance dans un contexte distribué. Sciences de l'ingénieur [physics]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2010. Français. NNT: . tel-00580848

HAL Id: tel-00580848

<https://theses.hal.science/tel-00580848>

Submitted on 2 May 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Table de matières

Table de matières.....	1
.....	1
I. INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	5
II. Position du problème.....	7
III. Cadre de l'étude	9
IV. Objectif des travaux :	10
1 Chapitre I.....	13
Évolution des besoins de maintenance.....	13
1.1 État de l'art.....	15
1.1.1 Conclusion de l'état de l'art.....	18
1.2 La fonction maintenance	18
1.2.1 Introduction.....	18
1.2.2 Définition de la maintenance	19
1.2.3 Rôle de la maintenance	19
1.2.4 Le management de l'entreprise et l'évolution de la maintenance	20
1.2.5 Les diverses politiques de maintenance	22
1.2.6 Orientation des politiques de maintenance.....	24
1.2.7 Internalisation-externalisation de la maintenance	25
1.2.8 Vers une maintenance centralisée dans les systèmes de production	25
1.2.9 Méthodologie de la maintenance centralisée.....	27
1.2.10 Conclusion.....	27
2 Chapitre II	29
Maintenance Distribuée : Concepts ; Évaluations ; Mise en œuvre.....	29
2.1 La Maintenance Distribuée en réseau.....	31
2.2 Le concept de la Maintenance Distribuée.....	32
2.3 Mise en œuvre d'un système de Maintenance Distribuée	33
2.3.1 Phase 1 : L'acquisition des données	35
2.3.2 Phase 2 : La génération des scénarios.....	36
2.3.3 Phase 3 : Le filtrage des scénarios proposés pour la Maintenance Distribuée. 38	

3	Chapitre III	51
	Conception et Modélisation d'un réseau d'Atelier de Maintenance Distribuée	51
3.1	Conception d'un atelier de maintenance	53
3.1.1	<i>Rôle et objectifs</i>	53
3.1.2	<i>L'intérêt d'une centralisation de la maintenance</i>	53
3.1.3	<i>Organisation structurelle du service maintenance</i>	54
3.1.4	<i>Conception d'un atelier de maintenance : dans le contexte distribuée</i>	56
3.1.5	<i>Amélioration de la disponibilité des sites de production</i>	59
3.2	Modélisation modulaire	61
3.2.1	<i>Les Réseaux de Petri Stochastiques Généralisés à la Synchronisation Interne (RdPSGSyl)</i>	61
3.2.2	<i>Pourquoi (RdPSGSyl) ?</i>	62
3.2.3	<i>Application au contexte distribué</i>	63
3.2.4	<i>Principe de la modélisation modulaire</i>	63
3.3	Modèles génériques	64
3.3.1	<i>Structure des modèles</i>	64
3.3.2	<i>Modèle générique du Stock</i>	65
3.3.3	<i>Modèle générique des Sites de Production</i>	68
3.3.4	<i>Modèle des ateliers de maintenance : Central et Mobile</i>	72
3.3.5	<i>Conclusion</i>	81
4	Chapitre IV	83
	Méthodologie d'application de la Maintenance Distribuée ; Dimensionnement de l'AdMm .	83
4.1	Principe général de la méthode.....	85
4.2	Acquisition des données	85
4.2.1	<i>Étape 1.1 - Acquisition des données géographiques</i>	85
4.2.2	<i>Étape 1.2 - Acquisition des données temporelles</i>	86
4.3	Classification des données.....	87
4.3.1	<i>Traitement des données de distances</i>	88
4.3.2	<i>Traitement des données temporelles</i>	89
4.4	Étape 3 : Identification de la fonction coût.....	90
4.5	Algorithme de calcul du Parcours économique	91
4.6	Application ; Cas de deux sites de production	93
4.7	Application ; Cas de trois sites de production	95
4.8	Application ; Cas complexe de quatre sites de production.....	98
5	Chapitre V	103
	Application – Simulation – Évaluation	103
5.1	Outil de simulation	105

5.2	Modèle boites noires.....	106
5.3	Modèle Simulation du Stock :	107
5.4	Modèle de Simulation du Site de Production SdP :.....	108
5.5	Synthèse des modèles Simulation :	111
5.6	Évaluation des Indicateurs de performance : exemples d'Application	111
5.6.1	<i>Un réseau d'ateliers de maintenance pour trois sites de production</i>	<i>111</i>
5.6.2	<i>Un réseau d'ateliers de maintenance pour quatre sites de production</i>	<i>114</i>
6	Conclusion générale et perspectives	125
7	Bibliographie.....	129
8	<i>Annexes</i> :.....	135
8.1	Annexe A. Les modèles simulation :	135
8.2	Annexe B. équitations des parcours, cas de 4 sites de production	143
8.3	Annexe C. L'outil de simulation : STATEFLOW/MATLAB,	144
8.4	Annexe D. Résultats d'influence d'emplacement de l'AdMc pour un exemple de système de trios sites de production	146

I. INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le développement économique qu'a connu la dernière décennie a engendré une concurrence intense entre les secteurs industriels. Cette concurrence s'est propagée sur le plan international et s'est caractérisée par l'implantation des entreprises étrangères partout dans le monde et parfois dans le même pays et ce, pour des raisons économiques et logistiques (près des marchés/clients et/ou près des matières premières).

Dans le domaine de l'automatisation, l'évolution technique a contribué à l'amélioration de la situation des entreprises industrielles en termes de fiabilité et de réduction du nombre d'interventions. Cette amélioration s'accompagne par une bonne gestion des outils et moyens techniques et une exigence en personnels de plus en plus spécialisés. Malgré le niveau de fiabilité atteint, le « zéro panne » reste impossible.

De ce fait, avec un nombre important de dysfonctionnements, les entreprises industrielles doivent à la fois produire, améliorer leurs outils de production et assurer le maintien en condition opérationnelle de leurs équipements. C'est ainsi que des solutions pratiques sont indispensables. En effet, afin d'assurer une rapidité de remise en état des équipements en panne, des solutions aussi bien stratégiques et méthodologiques que techniques sont nécessaires. À cet égard, il est essentiel de prendre un critère d'efficacité de ces méthodes qui dépendra du gain, aussi bien économique qu'au niveau fiabilité et rapidité. Ces critères agiront par conséquence sur le coût de la maintenance et sur la disponibilité des sites de production et leurs productivités.

Dans le secteur de l'industrie, au départ, les activités de maintenance ont été considérées comme une sous fonction de la production, et leurs rôles étaient rarement pris en compte comme une activité stratégique au sein de l'entreprise. Ils se résumaient à l'entretien et/ou dépannage ou aux actions de réparation après détection d'une défaillance. L'objectif est de remettre rapidement en service le système sans faire au préalable une analyse des causes et conséquences des défaillances. (MONCHY F., 2000 [47]). Ces actions d'entretien effectuées au cas par cas peuvent être justifiées par la complexité croissante des équipements et la non-prise en compte de la maintenance dans la phase de conception. Cependant, sous les effets conjugués de la crise économique et de la concurrence internationale, la fonction maintenance ne cesse d'évoluer entraînant des contraintes incontournables liées aux exigences de la baisse des coûts de production des biens et des services (ABBOU R., 2003[1]).

Le début des années quatre vingt, a été caractérisé par une évolution exceptionnelle de la régularisation des actions de maintenance et des budgets associés. L'apparition des méthodes relatives à la sûreté de fonctionnement, notamment la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité, a joué un rôle primordial dans cette évolution. Ces méthodes ont été appliquées dans certaines industries telles que les transports, la pétrochimie et les centrales nucléaires (SIMEU-ABAZI Z., 1998[57]). Dans les raffineries par exemple, les départements de production et de maintenance sont les plus importants en termes de personnel, chacun d'eux comportant environ 30% de la main d'œuvre totale (DEKKER R., 1996[22]).

En aéronautique, vu l'importance de l'aspect sécurité, les ateliers de maintenance sont conçus et dédiés à l'entretien des avions ; aussi bien les petits entretiens (réglage, inspection du moteur, ...) que les grands entretiens, qui correspondent à une révision majeure de l'avion lors de visites programmées (mise à plat des différents équipements et changement de pièces lourdes comme le moteur, ...).

Pour centraliser les ressources de maintenance, ces ateliers regroupent tous les appareils de mesure et d'intervention (test, réglage, désassemblage, . . .), un magasin de pièces de rechange et plusieurs techniciens de compétences divers (automaticiens, informaticiens, électriciens, hydrauliciens, etc.). Des techniques et des disciplines impliquées dans les données sont là pour répondre à la nécessité de contrôler la sécurité et la production de service, tout en optimisant les coûts et les durées de maintenance. Il est conseillé de contrôler les zones à risques, de prévenir les incidents pour éviter les accidents tout en évitant des frais supplémentaires prohibitifs. Dans ce contexte, ces secteurs nécessitent des ateliers de maintenance possédant des compétences scientifiques et techniques, et la mise en œuvre de stratégies de maintenance adaptées aux équipements et installations à entretenir.

Dans l'industrie, l'optimisation de la maintenance est basée sur la connaissance de la fiabilité des équipements et des politiques de maintenance adaptées. Les applications de ces politiques ont montré une grande amélioration au niveau de la performance triangulaire des systèmes industriels (Coût, Qualité, et Délai).

Selon le rapport de l'observatoire BIPE (Bureau d'Informations et de Prévisions Economiques), l'AFIM (Association Française des Ingénieurs et Responsables de Maintenance) relève que « Au total, sur la période de prévision 2007-2008 le marché de la maintenance a progressé de près de 245 millions d'euros pour atteindre 7,4 milliards d'euros environ, soit une progression annuelle moyenne de + 1,7% /an alors que la production industrielle ne devrait croître que de +1,4% /an. » comme le montre la Figure 1 .

Deux facteurs ont contribué à nourrir ce progrès (ABBOU R., 2003[1]) :

- Le développement de l'appel à des entreprises de service de plus en plus performantes pour l'externalisation des activités de maintenance (et parfois de production) pour certaines industries.
- La recherche de la réduction rapide des coûts de maintenance et l'amélioration de la productivité et de la qualité, par une mise en place d'un service de maintenance interne pour d'autres industries.

Néanmoins, il faudrait signaler que ces développements varient suivant le secteur d'activité, dans la mesure où chaque secteur industriel a ses propres évolutions et développe des politiques spécifiques de maintenance.

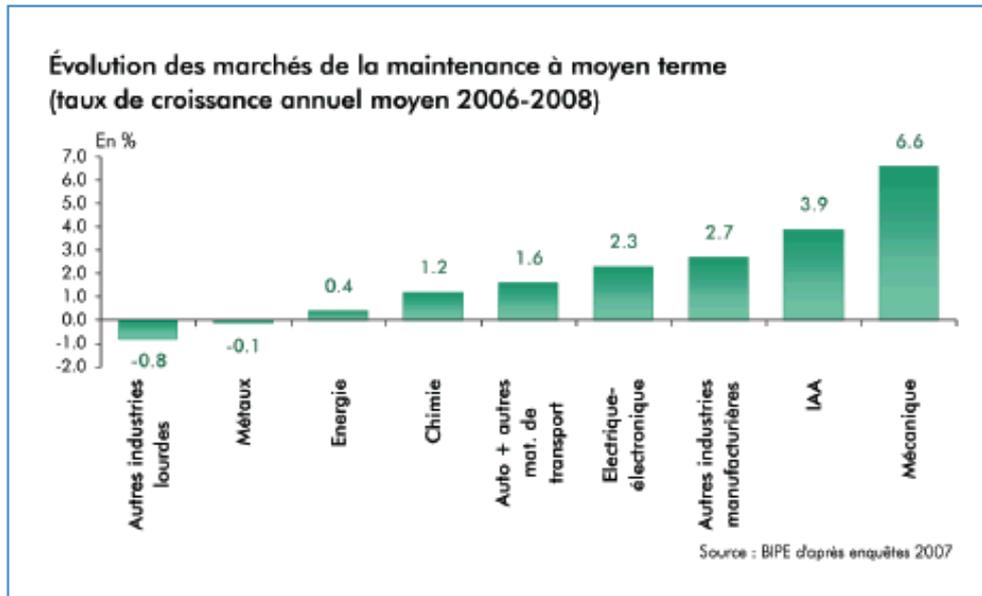


Figure 1 Évaluation des marchés de la maintenance à moyen terme

II. Position du problème

Dans ce travail, nous étudions en particulier le cas d'une entreprise constituée de plusieurs sites de production distribués géographiquement et possédant des machines complexes qui nécessite des techniciens spécialisés pour les diverses interventions de maintenance. Les équipements sont soumis à une maintenance préventive effectuée par un atelier mobile qui est en charge des visites régulières avec une politique de remplacement. Les équipements défaillants sont quant à eux réparés dans un atelier central de maintenance.

La réparation de certains équipements requiert des outils de maintenance assez lourds pour pouvoir les transporter jusqu'au site de production, ces outils sont spéciaux, précis et très coûteux. Les spécialistes du métier sont toujours à la recherche d'un système de maintenance adapté aux diverses machines de production. Dans ce travail, nous proposons une solution pour répondre aux exigences de ces systèmes. Un système de maintenance doit satisfaire trois types d'exigences :

✓ *Exigences techniques* :

Elles concernent les fonctions de la maintenance. Il s'agit donc de :

- Remettre les machines en pannes en bon fonctionnement dans un délai optimal tout en améliorant la qualité des interventions ;
- Améliorer le niveau de retour d'expérience pour mettre à jour le plan de maintenance et aussi faciliter la mise en place de nouvelles techniques d'une manière active.

✓ *Exigences économiques :*

Elles concernent les coûts de maintenance. Le système proposé doit, proposer d'une part, un bon service de maintenance. D'une autre part, il doit optimiser les ressources et maîtriser les coûts produits par les activités de maintenance. Cela ne peut être réalisé que par une logistique efficace.

En effet, le coût de maintenance peut être reparté dans différents coûts :

- Coût de ressources humaines pour effectuer les opérations préventives.
- Coût de ressources matérielles (pièces de rechange et outillage nécessaires pour la remise en service d'un équipement.
- Coût de transport et manutention pour les divers déplacements vers les sites demandeurs.
- Coût de communications et d'échange d'informations.
- Coût de retard dû à l'indisponibilité d'une des ressources.
- Autres coûts relatifs à la gestion et service de maintenance.

✓ *Exigences organisationnelles et gestion :*

Le système proposé doit gérer les ressources de maintenance (techniciens, pièces de rechange, ...), et planifier/ordonner les tâches de maintenance d'une façon adéquate avec celles de la production. Ce qui permet d'assurer une parfaite cohérence entre les phases de production et de maintenance. À titre d'exemple, si l'on raisonne en termes de productivité et de délai, un retard d'une action de maintenance peut entraîner un problème sécuritaire, mais aussi, augmenter le coût de maintenance.

Ainsi, ce système de maintenance doit prendre en compte à la fois, la réalisation des tâches techniques et des objectifs stratégiques et économiques, tout en étant en phase avec la production.

L'ensemble de ces exigences rend la tâche de la fonction maintenance complexe. Cette complexité s'accroît lorsque les sites de production n'ont pas les mêmes caractéristiques (matériels à la maintenance, calendrier, nombre de postes, ... etc.). Afin de faciliter le démarrage de cette étude, on supposera que les sites de production sont identiques du point de vue produit à maintenir et pas forcément identiques du point de vue de la nature de production (photocopieuses, distributeur automatiques des produits alimentaires, avions, ...etc).

Une des solutions adoptées par les entreprises est la sous-traitance du service de maintenance. Elle permet à l'entreprise de se concentrer sur ses activités principales de production. Pour de minimiser les coûts de maintenance, une classification des tâches de maintenance permettant ainsi de différencier les défaillances pris en compte par l'entreprise et celles effectuées par le sous-traitant est réalisée. Notons que le temps de réparation (temps d'indisponibilité) de l'équipement par un sous-traitant n'est pas maîtrisable.

L'inconvénient est, dans le cas de la défaillance, le temps d'attente pour une intervention, est non négligeable, parfois même très important et donc coûteux. Il dépend des différents paramètres comme la distance, la disponibilité des ressources nécessaires, ...

Vu la large gamme des machines, ceci induit, par conséquent, une grande diversité des ressources de maintenance. La réalisation des différents services de maintenance serait très onéreuse, ce qui ne permet pas forcément l'optimisation du coût d'investissement et de maintenance. Pour contourner ce problème, on supposera dans un premier temps que le service de maintenance est spécialisé dans un seul type de pièce de rechange.

III. Cadre de l'étude

Dans cette thèse nous proposons une solution sur les activités de l'atelier de maintenance dans un contexte multi-sites qui permet de prendre en compte les exigences citées. 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 ce contexte multi-site, l'AdM doit assurer la maintenance des équipements venant de différents sites de production. Afin de réduire l'occurrence des défaillances, cet atelier doit gérer les ressources (opérateurs, outillage et pièces de rechange), suivre en temps réel de l'état des équipements dans les différents sites et planifier les actions préventives. L'objectif est d'une part, de maximiser la disponibilité des systèmes de production en appliquant une politique de maintenance préventive par remplacement, et d'autre part, de minimiser les coûts de maintenance. Il est donc d'optimiser les ressources de maintenance (humaines et matériels) et de bien dimensionner les stocks de pièces de rechange. 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 échancier robuste, capable d'absorber les aléas de fonctionnement et garder un bon niveau de sécurité.

La solution proposée s'appuie principalement sur l'idée de regrouper l'ensemble des ateliers locaux de maintenance des sites de production afin de créer un atelier centrale. Les relations entre les sites de production et l'atelier de maintenance centrale sont réalisées par un atelier de maintenance mobile dont le rôle est de faire les remplacements des pièces défectueuses par des pièces neuves/réparées.

Dans cette thèse, les activités de l'Atelier de Maintenance (AdM) se retrouvent, donc réparties dans différentes structures:

- l'AdM Central (**AdMc**) qui réalise les réparations – maintenance corrective;
- l'AdM Mobile(**AdMm**) qui effectue des inspections et remplacement sur les différents sites de production.

- l'AdM Locale (**AdMI**) qui effectue les simples opérations de maintenance telles que les réglages et les remplacements mineurs au niveau des sites de production.

La Figure 2 représente le contexte de l'étude et met en évidence les relations entre les différents sites (Simeu-abazi, 2007, [58]).

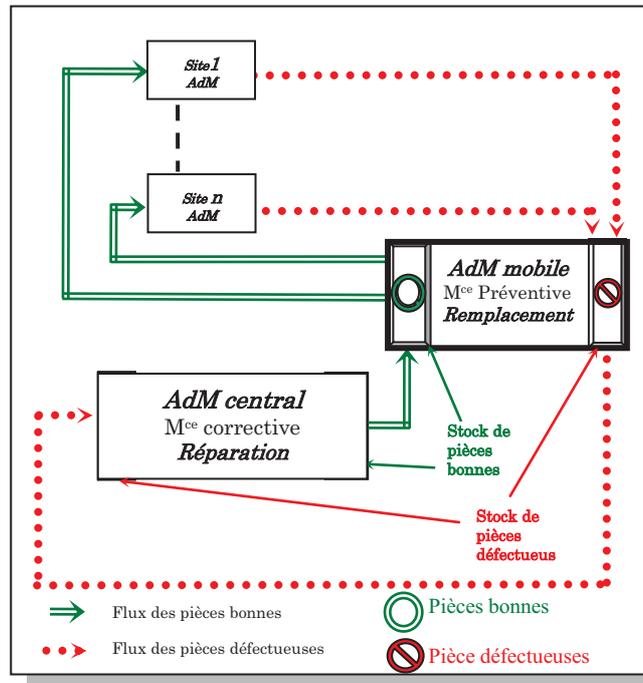


Figure 2 Relations entre les différents sites de production et les ateliers de maintenance

Dans ce contexte distribué notre objectif est d'améliorer la disponibilité des sites de production en intégrant de manière efficace les actions de maintenance. Pour ce faire, il est nécessaire de modéliser chacun des ateliers pour évaluer les coûts et la disponibilité des différents sites.

IV. Objectif des travaux :

Notre premier objectif est d'intégrer la fonction de maintenance dans un système de production possédant plusieurs sites de production afin d'améliorer leurs performances et leurs sûreté de fonctionnement. Cette intégration se fait depuis la phase de conception jusqu'à la réalisation et la mise en œuvre. La modélisation est basée sur l'utilisation des « Réseaux de Petri » bien adaptés au cas d'étude.

Nous avons choisi la simulation des différents modèles pour l'analyse et l'évaluation de l'impact de maintenance. Les différents modèles Réseaux de Petri

proposés seront simulés grâce à l'outil « STATFLOW/MATLAB ». Cette simulation nous permet le calcul de certains indicateurs, notamment le coût de maintenance.

On retrouve ainsi, les trois phases classiques : la modélisation de l'ensemble des ateliers, l'analyse de leurs performances, et la simulation qui permet d'identifier la solution optimale du point de vue coût.

Le **Chapitre 1** présente un état de l'art de la maintenance et l'intégration des fonctions de maintenance et production. Il présente quelques définitions et notions de base sur la fonction de maintenance. Nous avons classé des travaux selon les objectifs d'optimisation et de gestion. Le concept d'AdM est introduit ainsi que les besoins en maintenance dans un contexte distribuée.

Dans le **Chapitre 2**, nous nous intéressons à la mise en œuvre et à l'évolution de la maintenance distribuée. Dans ce contexte, ce chapitre montre les avantages de la maintenance distribuée et son mode de fonctionnement en réseau. Ainsi que la méthodologie d'évaluation d'un système de maintenance distribuée.

Le **Chapitre 3** traite l'approche modulaire, son principe et l'utilisation de l'outil de modélisation utilisé (à savoir, les Réseaux de Petri Stochastique Généralisés à la Synchronisation Interne, RdPSGSyD). Nous donnons les modèles génériques de référence pour chaque composant du système ainsi que la construction du modèle globale de type de boîte noire.

Le **Chapitre 4** traite la conception, la modélisation modulaire et le dimensionnement des composantes d'un réseau d'ateliers de maintenance. Une organisation structurelle est proposée ainsi que l'ordonnancement des tâches de maintenance et le dimensionnement des ressources.

Les développements proposés sont réalisés sous certaines hypothèses définies dans ce chapitre. Afin de dimensionner les ressources, différents scénarios sont traités avec une étude comparative de leurs performances.

La simulation des différents modèles fait l'objet du **Chapitre 5**. Nous proposons dans ce chapitre une simulation numérique qui permet d'extraire des indicateurs de performance pour la mise au point d'un système d'aide à la décision pour la maintenance distribuée.

Toutes les simulations dans ce mémoire et les résultats extraits que ce soit outils de calcul ou de décision, évaluation des indicateurs de performance de maintenance distribuée ou de sûreté de fonctionnement, ont été réalisés en utilisant le logiciel MATLAB notamment MATLAB/SIMULINK/STATFLOW. Des modèles de simulation sont donnés en Annexes.

Afin de montrer l'intérêt de ce travail dans l'industrie, à défaut d'avoir une application réelle, deux exemples illustrent l'approche proposée dans ce mémoire. Cette approche est une aide à la décision sur l'emplacement de l'AdM, le choix de la capacité de stockage optimale ainsi que le nombre d'opérateurs nécessaires.

Enfin, nous concluons en donnant quelques perspectives mettant en évidence les évolutions futures de ce travail.

1 Chapitre I

Évolution des besoins de maintenance

.....

Le phénomène de concurrence a exigé des entreprises des efforts colossaux pour être compétitif et assurer leur pérennité sur le marché. Ainsi, pour assurer une meilleure rentabilité avec de faibles charges et une production de meilleure qualité et en continu, l'entreprise s'est trouvée contrainte d'assurer une fonction de maintenance afin de répondre aux besoins de sa clientèle et garantir sa profitabilité.

Le maintien en condition opérationnelle des outils de production est devenu un élément très important pour la bonne marche de l'activité des entreprises et la prise en charge des risques de défaillance pouvant survenir à tout moment.

L'objectif de ce chapitre est de mettre en relief la notion de maintenance, son importance et les différentes pratiques existantes selon la taille et la productivité de l'entreprise.

1.1 État de l'art

Avant de présenter les travaux menés dans la littérature dédiés à la maintenance, il est nécessaire de faire un focus sur la classification des activités de maintenance (voir Figure 1.1).

Dans une entreprise, les activités de maintenance sont, soit des activités de maintenance externe pour des interventions de sous traitant, soit des activités de maintenance interne pour des actions internes à l'unité de production. Dans ce dernier cas soit la maintenance est intégrée à la production, on appelle ce type « maintenance intégrée ». Elles sont regroupées dans un atelier central. On appelle ce type de maintenance« maintenance centralisée ».

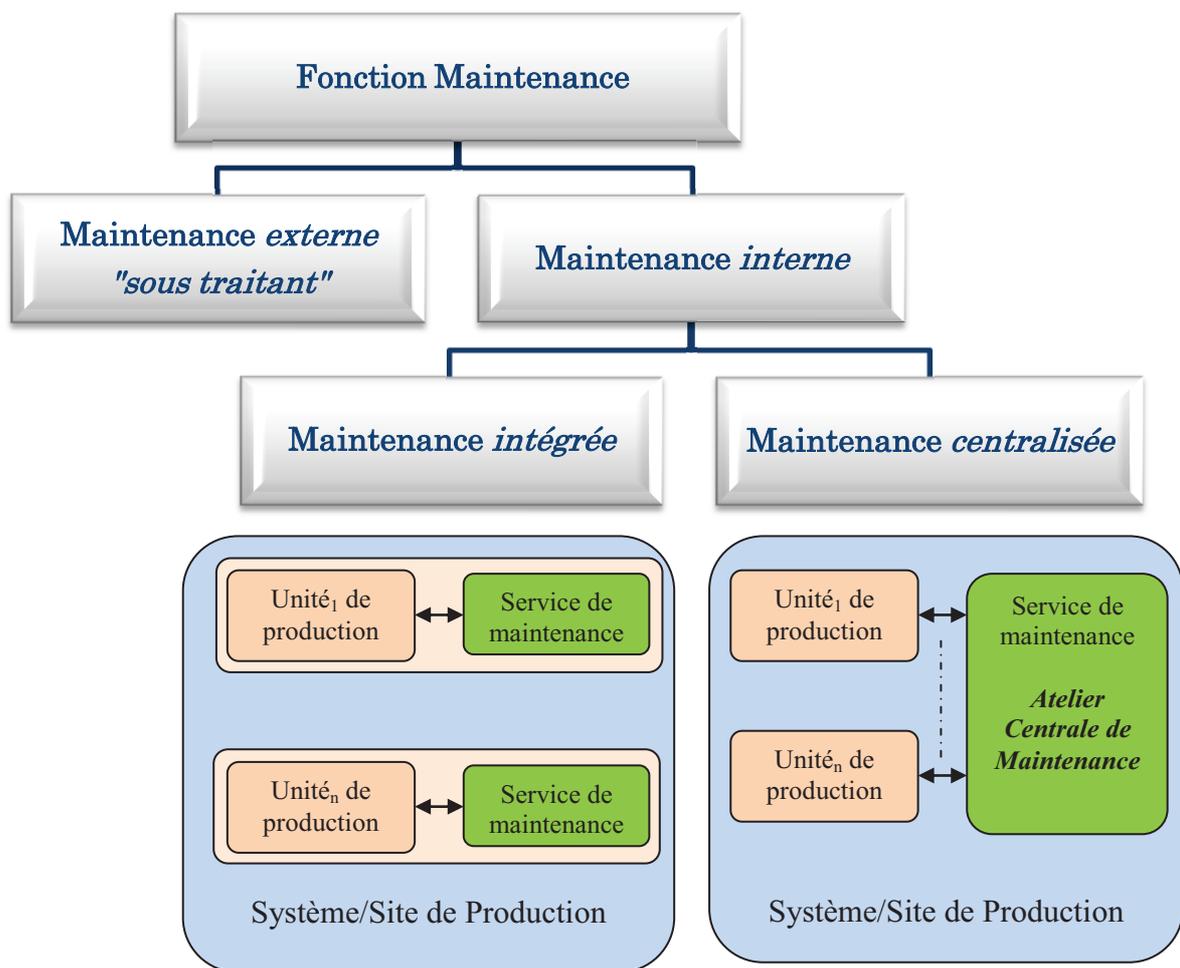


Figure 1.1 Hiérarchie de la fonction maintenance

Différents travaux ont été réalisés autour de la Maintenance Intégrée. (SASSINE Ch., 1998[55]) a introduit dans ses recherches la prise en compte des interrelations entre les services de production et de maintenance. Leurs objectifs étaient d'améliorer la disponibilité des unités de production et de réduire le coût de maintenance en réduisant le coût de ses ressources.

La notion de la maintenance centralisée, dans la thèse de (ABBOU R., 2003[1]) à travers la conception d'un atelier central de maintenance, qui a prouvé que la centralisation de maintenance permet, d'optimiser les ressources nécessaires aux activités de maintenance. De plus elle assure une assistance technique, une standardisation des procédures de maintenance et l'amélioration du niveau de communication et du retour d'expérience. En conséquence, une meilleure maîtrise des durées d'intervention ainsi que des coûts engendrés est obtenue.

Les premiers travaux qui synthétisent **la méthodologie des stratégies de maintenance**, ont été introduits par (ZWINGELSTEIN G., 1996[67]).

La Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF) est née dans le secteur aéronautique à la fin des années 1970 avec les avions gros porteurs. Normalisée sous le nom de RCM (Reliability Centered Maintenance), elle est aujourd'hui utilisée par toutes les compagnies aériennes majeures et dans les autres secteurs industriels en quête de compétitivité. Le principe de cette politique de maintenance, structurée et rationnelle, est d'identifier les matériels dont les modes de défaillances ont des conséquences significatives pour les objectifs de l'entreprise (productivité, sécurité, qualité, coûts...) et de ne retenir que des tâches efficaces et applicables de maintenance préventive. L'ouvrage analyse en détail les étapes indispensables pour établir les programmes de maintenance préventive, met en relief les problèmes de changement de culture associée à une mise en place et à la pérennité d'une démarche MBF. L'ouvrage est illustré d'exemples de ses applications industrielles et d'un historique de son développement dans l'industrie aéronautique. Il précise l'importance des rôles de l'analyse fonctionnelle et du retour d'expérience. En conclusion, il fournit un ensemble de recommandations pour une mise en place efficace de la MBF en précisant les avantages et limitations des différentes variantes opérationnelles de celle-ci.

Il est noté que parmi les facteurs qui contribuent au maintien et l'amélioration de la disponibilité et à la sûreté de fonctionnement des installations industrielles complexes, les méthodes de diagnostic de défaillances représentent des leviers significatifs. Le diagnostic industriel peut se formuler comme la modélisation de la relation de cause à l'effet sous l'angle d'une relation de causalité déterministe. Dans (ZWINGELSTEIN G., 1995[66]) des méthodologies associées à la résolution du problème de diagnostic des défaillances des systèmes industriels complexes sont proposées avec un ensemble de solutions inductives et déductives pour le diagnostic interne et externe de système. Chaque méthode est exposée avec des recommandations sur leurs limites d'utilisation. L'ouvrage constitue un support pour mettre en œuvre les méthodes de diagnostic de défaillances des systèmes industriels.

Concernant **la gestion de la maintenance dans les systèmes industriels**, plusieurs travaux proposent des démarches méthodologiques :

(DEBORDE R., GEORJON A., 1999[21]), (FRANCASTEL J-C., 2001[27]), (PRINCIPE R., JACQUEMYNS Y.[50]) (RUSTENBURG J., 2000[54]) et (GOSSE B., SARGIS C., SPRIMONT P., BENAVENT C., 2000[29]).

Dans (DEBORDE R., GEORJON A., 1999[21]), une approche appelée " technicien de maintenance" est définie. Elle est basée sur l'analyse des principes de fonctionnement sans oublier la conception et l'étude des solutions technologiques. Son ouvrage comporte des dossiers techniques qui peuvent être utilisés tels quels ou rebâtis pour créer de nouvelles situations d'apprentissage.

Dans le cas de l'externalisation de la maintenance, (FRANCASTEL J-C., 2001[27]), s'intéresse à la prise en compte de compétences externes. Les exigences accrues de flexibilité et de réactivité, le développement de spécialisations pointues, obligeant les exploitants industriels et les propriétaires de patrimoines à se tourner vers des compétences extérieures. Sous-traitance, partenariat, ou alliance. Il existe des méthodes, des lois, des normes et des résultats d'expériences qui restent à valoriser. Cet ouvrage propose des solutions pour l'externalisation de la maintenance, en abordant :

- la stratégie : présentation du marché et des acteurs de la maintenance, critères de choix de l'externalisation.

- le cadre relationnel : textes de lois et normes relatifs au sujet, clés pour le choix du prestataire.

- le contrat : éléments contractuels (cahier des charges, clauses juridiques et commerciales), exemples de rédaction, et contrôle des performances.

D'autres travaux concernent directement les responsables maintenance, directeurs techniques, chefs d'entreprise, et aux consultants en gestion industrielle, par exemple (CUIGNET R, 2002[19]). Il propose une approche pour améliorer les performances opérationnelles et financières de maintenance dans les entreprises industrielles. Il est précisé dans cet ouvrage que pour éviter les problèmes liés aux retards de livraison, stocks surdimensionnés, problèmes de trésorerie... il est nécessaire de mettre en place un management efficace et pertinent de la maintenance. Cet ouvrage décrit les méthodes et les outils qui permettent d'assurer cette efficacité. Il présente des critères d'un référentiel de bonnes pratiques de management et des actions à mettre en œuvre afin de valoriser ces enjeux et améliorer les performances de la maintenance au niveau opérationnel (fiabilité et volumes de production), financier (coûts et rentabilité des capitaux engagés) et humain.

Certains travaux concernent **l'évaluation de l'impact des politiques de maintenance appliquées sur des machines de production** comme (AÏT-KADI D., et al., 2010[5]) (ENSCORE E. et BURNS D., 1983[26]), (BANERJEE A., FLYNN B, 1987[12]), (KELLY C. et al., 1997[37]), (KUHN H., 1999[38]), (CHATELET E. et al., 2002[18]), (ZEMOURI R. et al., 2003[65]). Ce dernier présente les résultats d'une étude d'amélioration des performances d'un service de maintenance des unités de production dans un site d'Automobile. Sa mission s'appuie principalement sur une étape de modélisation par les réseaux de Petri Stochastiques. Il calcule le taux d'occupation de chaque place du modèle. Ce taux d'occupation prend en considération les taux d'entrée et de sortie correspondant aux différentes étapes du processus de réparation. Il considère ce taux comme un indicateur de performances du système. Les problèmes de manque de données dans l'historique de réparation de l'entreprise, ont été contournés grâce à une démarche déductive itérative par simulation.

Dans les travaux concernant le problème **d'Optimisation des coûts** de maintenance : certains auteurs se basent sur la marge du coût dans le cas de maintenance préventive (AÏT-KADI D., et al., 2010[5]) (Kaffel H., 2001[34]) (DEKKER R. et ROELVINK I., 1995[24]) et (FRENK J. B. G., DEKKER R., KLEIJN M. J., 1995[28]), d'autres références considèrent l'optimisation du point de vue management (LOUNIS, VANIER D.J., 1998[43]) ou d'ordonnancement (TIANHAI Z., YONG Q.i, JUNYI S., DI H., XIAOMEI Z., 2006[63]). Ce dernier, présente des résultats numériques qui montrent qu'une meilleure réorganisation du calendrier des activités de maintenance peut réduire les coûts de maintenance.

La fonction maintenance

Au niveau de logiciel nous trouvons : (HARRY M. S., 2004[30]), (JANSEN S., RIJSEMUS W., 2006[32]), (JONGE M., MONAJEMI R., 2001[33]) et (KEIZERS J., ADAN I., VAN DER WAL J., 2001[36])

Pour plus d'informations, le lecteur peut consulter d'autres travaux concernant la gestion de maintenance et son optimisation. Il nous suffit ici de signaler ces références, comme (Simeu-Abazi, 2000[59]), (AÏT-KADI D., NOURELFATH M., 2007[4]) et (Simeu-Abazi et al., 2000[1]) .

Le problème « *organisation et la structuration de la maintenance* » n'a pas été trop abordé. Peu de travaux ont considéré la fonction maintenance comme une fonction stratégique au sein de l'entreprise et ont pris en compte ses activités dans la structuration en phase de conception du système de production conjointement avec la fonction de production. Au LAG (Laboratoire d'Automatique de Grenoble) (KATTAN B., 2000[35]), suivi par (ABBOU R., 2003[1]) sont les seuls référence, à notre connaissance, qui ont abordé la conception d'un atelier de maintenance basée sur la mise en œuvre d'une maintenance centralisée dans un système manufacturier possédant plusieurs unités de production.

1.1.1 Conclusion de l'état de l'art

Les références existantes traitent de la maintenance dans l'optique d'améliorer la production, d'optimiser la maintenance par la résolution des problèmes d'organisation et de gestion les ressources de maintenance, et qui sont trop centrés sur le maintien des systèmes à risque (avion, nucléaire, naval, ...) et un peu moins sur les secteurs de production manufacturiers.

Ils s'intéressent à la résolution des problèmes qui peuvent apparaître, et ceci dans les meilleurs cas, prévenir ces problèmes et proposer des pré-solutions, toujours pour des systèmes qui sont déjà structurés. Ainsi, dans ce cas, la fonction de maintenance reste toujours une fonction insérée dans un bloc de taille déterminée et souvent limité, et elle doit s'adapter avec les contraintes et les critères de ce bloc.

1.2 La fonction maintenance

1.2.1 Introduction

Pour être et demeurer compétitive, une entreprise doit produire toujours mieux (qualité) et au coût le plus bas. Pour minimiser ce coût, on fabrique plus vite et sans interruption des produits sans défaut afin d'atteindre la production maximale par unité de temps.

L'automatisation et l'informatique ont permis d'accroître considérablement cette rapidité de production. Cependant, les limitations technologiques des moyens de

production ne permettent pas d'augmenter continuellement les cadences. De plus, produire plus sous-entend produire sans ralentissements, ni arrêts. Pour cela, le système de production ne doit subir qu'un nombre minimum de temps de non production. Exceptés les arrêts inévitables dus à la production elle-même (changements de gamme, montées en température, etc.), les machines ne doivent jamais (ou presque) connaître de défaillances tout en fonctionnant à un régime permettant le rendement maximal.

Cet objectif est un des buts de la fonction maintenance d'une entreprise. Il s'agit de maintenir un bien dans un état lui permettant de répondre de façon optimale à sa fonction. L'objectif de toute entreprise industrielle est de gagner des parts de marché et d'arriver à satisfaire un plus grand nombre de consommateurs. L'atteinte de cette cible dans un environnement concurrentiel exige une production de meilleure qualité avec une maîtrise des coûts engendrés.

1.2.2 Définition de la maintenance

Selon l'AFNOR par la norme NF X 60-010, la maintenance se définit comme étant : ensemble des actions permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié ou en mesure d'assurer un service déterminé. Bien maintenir, c'est assurer l'ensemble de ces opérations au coût optimal.

La définition de la maintenance fait donc apparaître 4 notions :

- ⇒ **Maintenir** qui suppose un suivi et une surveillance
- ⇒ **Rétablir** qui sous-entend l'idée d'une correction de défaut
- ⇒ **État spécifié** et **service déterminé** qui précise le niveau de compétences et les objectifs attendus de la maintenance ;
- ⇒ **Coût optimal** qui conditionne l'ensemble des opérations dans un souci d'efficacité économique

Le rôle de la fonction maintenance dans une entreprise (quelque soit son type et son secteur d'activité) est donc de **garantir la plus grande disponibilité des équipements au meilleur rendement tout en respectant le budget alloué**.

1.2.3 Rôle de la maintenance

Le service maintenance doit mettre en œuvre la politique de maintenance définie par la direction de l'entreprise ; cette politique devant permettre d'atteindre le rendement maximal des systèmes de production. Cependant, tous les équipements n'ont pas le même degré d'importance d'un point de vue maintenance. Le service devra donc, dans le cadre de la politique globale, définir les stratégies les mieux adaptées aux diverses situations. La fonction maintenance sera alors amenée à établir des prévisions ciblées :

- **Prévisions à long terme** : elles concernent les investissements lourds ou les travaux durables. Ce sont des prévisions qui sont le plus souvent dictées par la politique globale de l'entreprise.
- **Prévisions à moyen terme** : la maintenance doit se faire la plus discrète possible dans le planning de charge de la production. Il lui est donc nécessaire d'anticiper, autant que faire se peut, ses interventions en fonction des programmes de production. La production doit elle aussi prendre en compte les impératifs de suivi des matériels.
- **Prévisions à courts termes** : elles peuvent être de l'ordre de la semaine, de la journée, voire de quelques heures. Même dans ce cas, avec le souci de perturber le moins possible la production, les interventions devront elles aussi avoir subi un minimum de préparation.

Nous nous intéressons dans la démarche de cette thèse de la maintenance en moyens et long terme.

1.2.4 Le management de l'entreprise et l'évolution de la maintenance

Dans l'entreprise, la fonction « maintenance » consiste de moins en moins souvent à remettre en état l'outil de travail mais de plus en plus fréquemment à anticiper ses dysfonctionnements.

L'arrêt ou le fonctionnement anormal de l'outil de production, et le non-respect des délais qui s'en suivent, engendrent en effet des coûts que les entreprises ne sont plus en état de supporter. Elles ne peuvent plus attendre que la panne se produise pour y remédier mais doivent désormais s'organiser pour procéder aux diverses opérations qui permettent de l'éviter. On est ainsi passé d'une « maintenance curative » à une « maintenance préventive », qui se traduit par la définition de plans d'actions et d'interventions sur l'équipement, par le remplacement de certaines pièces en voie de dégradation, le graissage ou le nettoyage régulier de certains ensembles afin d'en limiter l'usure.

Ces actions préventives étaient dans un premier temps effectuées de façon systématique selon des calendriers prédéfinis. Elles permettaient effectivement d'anticiper les pannes, mais au prix d'une augmentation importante des coûts de maintenance. Grâce à l'évolution des technologies de diagnostic et de contrôle, en particulier des capteurs, une nouvelle maintenance se développe aujourd'hui. Elle utilise des techniques de prévision des pannes comme, par exemple, l'analyse des vibrations ou des huiles. Ce stade ultime de la maintenance, dite « prédictive » ou « préventive conditionnelle », permet de remplacer des pièces avant leurs ruptures.

Le passage de la maintenance curative à la maintenance préventive conditionnelle n'est cependant pas systématique. Il vise moins à minimiser les coûts de maintenance qu'à les optimiser en fonction des objectifs de production. Il peut ainsi être économiquement rentable d'appliquer une maintenance préventive systématique à un processus de production particulier. A titre d'exemple, appliquer une maintenance préventive pour un produit phare à forte marge bénéficiaire, alors que la maintenance

curative peut s'avérer la seule «économiquement acceptable». De même pour un autre produit ou équipement, sur lequel on a l'expérience et l'habitude de réparer des pannes appliquer une maintenance corrective.

Les entreprises opèrent donc des choix parmi les différents types de maintenance en fonction de multiples éléments techniques, économiques, de facteurs internes ou externes : la fréquence des défaillances cycliques ou aléatoires des équipements, les aptitudes et compétences du personnel de maintenance ou des sous-traitants, les politiques et modes d'organisation du travail, la position concurrentielle sur le marché, les produits...

Le développement de la maintenance préventive tend à favoriser une deuxième évolution : les activités de maintenance les plus simples (de premier voire de second niveau selon les normes AFNOR) sont transférées aux opérateurs de production, ce qui devrait entraîner une diminution des effectifs d'agents de maintenance. Cette évolution n'est toutefois pas systématique. Divers facteurs peuvent en effet parfois s'y opposer : tout d'abord des facteurs d'ordre techniques, tels la coexistence dans les équipements de plusieurs générations de machines et donc de technologies différentes, l'éloignement physique de l'opérateur par rapport à son outil de production, son impossibilité d'accéder à cet outil pour des raisons de sécurité... ; des facteurs organisationnels également, dans le cas où l'intervention d'un service de maintenance décentralisé s'avère plus efficace ou plus rapide; enfin, des facteurs humains, lorsque par exemple les opérateurs de production ne sont pas suffisamment formés ou motivés, voire ne sont pas habilités, pour effectuer certaines activités de maintenance.

Troisième évolution majeure : la part des activités de maintenance confiée à des entreprises extérieures spécialisées augmente (cf. encadré page ci-dessous §1.2.6). Plusieurs facteurs expliquent ce développement de la sous-traitance. Réalisée par des spécialistes, elle est sur le plan technique un gage de qualité et d'efficacité.

D'un point de vue organisationnel, les entreprises tendent actuellement à se recentrer sur leur fonction principale, et à déléguer ce qui ne relève pas de leur métier. Enfin, l'externalisation minimise les coûts de la maintenance : l'entreprise paye au «service» et n'a donc pas à supporter le coût lié à la présence permanente d'un service maintenance très important. Mais la sous-traitance de la maintenance ne va pas nécessairement continuer à se développer. Elle a investi jusque-là des segments de production périphériques au cœur du métier des entreprises. Or elle ne peut aller au-delà de ce stade sans risquer de gravement les fragiliser. Du fait de l'évolution constante des technologies, les entreprises perdraient alors des champs de compétences, de savoirs. Elles manqueraient alors de recul, de visibilité, pour évaluer la valeur des interventions de maintenance réalisées et deviendraient incapable de juger de la qualité des interventions, et surtout de la pertinence des coûts facturés.

Dernière grande évolution en partie liée au développement de la sous-traitance : la généralisation des normes et méthodes. Les exigences des entreprises donneuses d'ordres se traduisent par la nécessité pour les prestataires de services d'être détenteurs de différentes certifications (une norme ISO, par exemple), de différentes habilitations.

Plus généralement, les entreprises sont engagées dans des politiques de qualité totale, et les activités de maintenance se doivent d'appliquer ces politiques. Or la certification apparaît parfois contraignante. Le problème n'est pas tant posé par les normes en elles-mêmes que par les méthodologies qui en sont déduites, très exigeantes notamment sur la formalisation des procédures d'intervention. En effet, si une entreprise possède déjà une organisation et des méthodes de gestion cohérentes, la démarche de certification se limitera à une simple formalisation des procédures déjà en place. Au contraire, si l'entreprise n'a peu, voire pas, de règles de gestion de la

maintenance, la démarche de certification risque de provoquer d'importants bouleversements, en particulier dans le contenu des tâches.

1.2.5 Les diverses politiques de maintenance

Pour mieux rentabiliser les équipements, il faut choisir une stratégie adéquate de maintenance. Ainsi, au sein du service de maintenance, on distingue globalement deux politiques de maintenance : la Maintenance Corrective (MC) et la Maintenance Préventive (MP).

a) La Maintenance Corrective (MC) :

Elle regroupe les différentes opérations effectuées après l'apparition d'une défaillance sur un équipement donné. Ces opérations interprètent notamment la localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état avec ou sans modification et le contrôle à la fin du bon fonctionnement.

Après le test qui se fait par une comparaison permanente entre des valeurs mesurées et des valeurs références des paramètres spécifiés du système, une déclaration d'apparition d'une défaillance est émise au système de surveillance indiquant une détection d'une panne et localisant le/les élément(s) défaillants. Une action Diagnostic identifie la cause/l'origine de défaillance en utilisant une base de données (historique ou logique) et précise les opérations de Maintenance Corrective nécessaires. Le dépannage caractérise un type de maintenance corrective : c'est la Maintenance Palliative où la réparation est provisoire. Un autre type de Maintenance corrective : c'est la Maintenance Curative qui est caractérisée par une réparation parfaite (définitive) c'est-à-dire, la remise de l'élément défaillant en état de fonctionnement avec les spécifications d'origine. Le but est d'éviter éventuellement la réapparition de la même défaillance est d'assurer par une action de contrôle destinée à vérifier le bon fonctionnement des dépannages et réparations. Un retour d'expérience (réalisé par la mémorisation les historiques des pannes et l'ensemble de leurs actions de maintenance associées) assure l'amélioration des interventions ultérieures.

b) La maintenance préventive (MP) :

Celle-ci a pour l'objectif de ralentir la dégradation de l'équipement et par conséquent réduire la probabilité d'occurrence d'une défaillance.

On trouve aussi une maintenance dite de ronde qui se caractérise par une surveillance régulière de l'équipement sous forme de visite à fréquence élevée, entraînant si nécessaire des travaux mineurs d'entretien.

La Maintenance dite Mixte consiste à profiter de l'opportunité offerte par l'arrêt d'un système pour effectuer parallèlement d'autres interventions, prévues ou non, sur d'autres éléments.

Il faut noter que, le système considéré peut être :

- ✓ Une machine : lors de la défaillance d'un équipement, on profite de l'arrêt de la machine pour effectuer des interventions sur d'autres équipements de la même machine ;

- ✓ Une ligne de production : lors de l'arrêt de la machine, des interventions sont réalisées sur une ou plusieurs machines de la même ligne et dont l'arrêt ne pénalisera pas le fonctionnement de l'unité de production.

La Figure 1.2 résume les différents concepts de maintenance qu'on trouve dans la littérature, en indiquant les événements initiateurs.

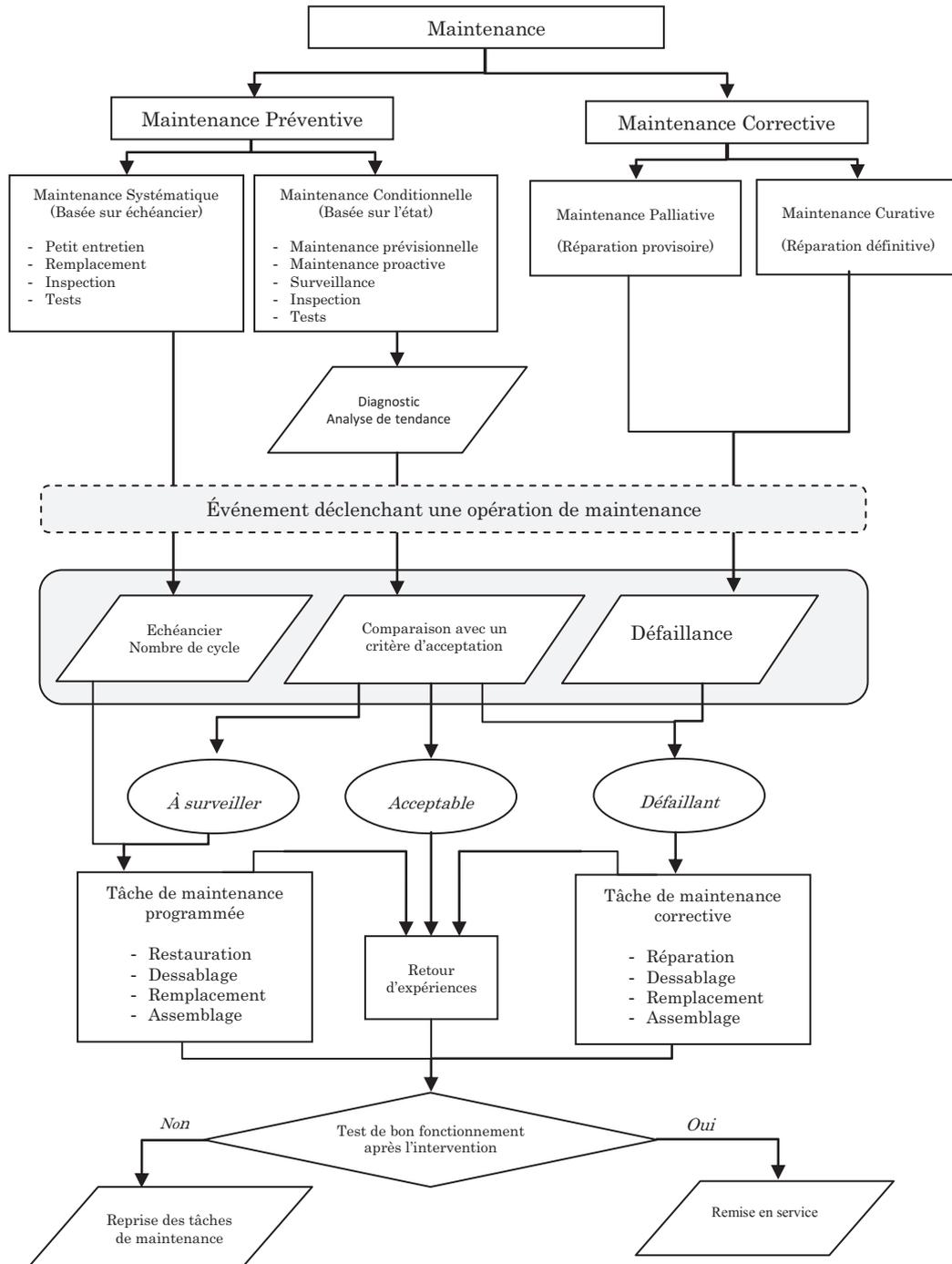


Figure 1.2 Diagramme des différents politiques de maintenance.

1.2.6 Orientation des politiques de maintenance

Les décisions d'appliquer une fonction maintenance reposent sur trois critères, qui déterminent trois grandes orientations des politiques de maintenance (CHARLES A-S, 2000[17]). Les trois notions sont :

- Le Coût.
- La Disponibilité.
- La Fiabilité et Maintenabilité.

Les différentes stratégies existantes s'articulent autour des points ci-après :

✓ Stratégie basée sur le « Life Cycle Cost (LCC) »

La grandeur Life Cycle Cost -en français dit : coût du cycle de vie- désigne la somme des coûts d'investissement de l'équipement, des coûts cumulés d'utilisation et des coûts de maintenance, sur la durée de vie de l'équipement.

La difficulté majeure de cette approche est l'estimation des différents coûts intervenant durant le cycle de vie d'un équipement.

✓ Stratégie basée sur le « Total Productive Maintenance (TPM) »

La stratégie Total Productive Maintenance a été initiée au Japon dans les années 1970 et s'inscrit dans une stratégie du zéro défaut, zéro délai, zéro stock et zéro panne. Elle met l'accent sur l'organisation des ressources productives pour améliorer la disponibilité des équipements. Elle a pour objectif :

- ⇒ D'améliorer l'efficacité du service maintenance (maintenance préventive, systématique ou conditionnelle, la Gestion de la Maintenance Assistée par Ordinateur - GMAO -);
- ⇒ De mettre en place l'auto-maintenance ;
- ⇒ De suivre quantitativement la productivité des équipements en améliorant le Taux de Rendement Synthétique (TRS) ;
- ⇒ D'améliorer la productivité globale des équipements sur tout le cycle de vie.

✓ Stratégie basée sur la « Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF) »

Cette stratégie s'établit sur l'amélioration de la fiabilité qui se définit comme étant l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, durant un intervalle de temps donné, et la maintenabilité qui signifie l'aptitude d'un bien, dans des conditions données d'utilisation, à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est réalisée dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits.

1.2.7 Internalisation-externalisation de la maintenance

Actuellement, de plus en plus d'entreprises décident d'externaliser des activités en général, mais l'explication la plus souvent donnée pour justifier une décision de sous-traitance est que les managers préfèrent garder les compétences fondamentales en interne et externaliser les activités non fondamentales. (HEIKKILÄ J., 2003[31]).

Les activités de maintenance sont considérées comme des compétences de protection, autrement dit ce sont des activités qui peuvent mettre en cause la réussite de l'ensemble de l'entreprise si elles ne sont pas gérées de manière adéquate. Ainsi, deux choix se présentent, le premier choix est de sous-traiter toutes les activités de maintenance à condition de garantir la pérennité du service sous-traitant et avec un niveau de risque minimal. Le deuxième choix correspond à l'intégration d'un service de maintenance dans le système de production. Dans ce cas, munir chaque unité de production d'un service de maintenance devient vite très coûteux lors de l'investissement dans les ressources.

1.2.8 Vers une maintenance centralisée dans les systèmes de production

Une maintenance centralisée permet d'assurer la cohérence de l'ensemble des activités diversifiées, éparpillées entre les sites de production et l'atelier central, et opérées par des techniciens de qualifications différentes.

Les ressources de maintenance sont alors les ressources de l'atelier centrale (techniciens, outils de maintenance, pièces de rechange) et les outils/moyens de transporter les équipements d'un site de production à l'atelier centrale.

L'approche systémique de la maintenance centralisée est inspirée de l'approche d'une maintenance intégrée. Cette approche est organisée principalement autour de trois profils ou services avec la classification schématique illustrée par la Figure 1.3 (Monchy, 2000[47]) : Méthodes, Planification et Réalisation.

- ⇒ *Service Méthodes* : ce service définit les cahiers des charges et les règles d'actions liées aux spécifications techniques, aux délais, aux coûts et à l'approvisionnement. Ce service veille au bon déroulement du système de maintenance en respectant les consignes de sûreté de fonctionnement tout en identifiant et optimisant les coûts des activités de maintenance.
- ⇒ *Service Décision* : son rôle s'oriente d'avantage vers la recherche et la mise en œuvre de solutions techniques visant à remédier aux défaillances et à améliorer le rendement des différentes installations de production.
- ⇒ *Service Réalisation* : Ce service regroupe toutes les ressources de maintenance (techniciens ou agents de maintenance de compétences diverses, postes d'intervention, magasin de pièces de rechange).

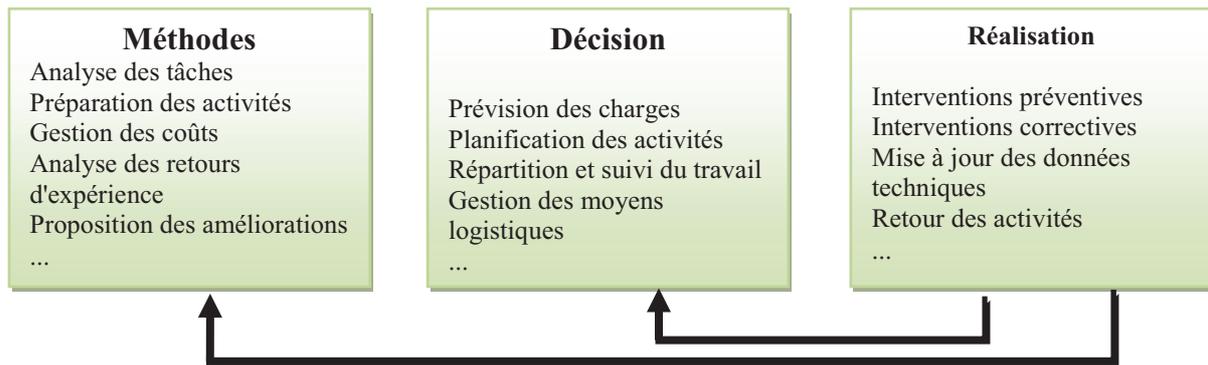


Figure 1.3 Fonctions de l'atelier de maintenance

La maintenance est caractérisée par une très grande variété de tâche que l'on peut différencier par rapport à leur nature, leur spécificité et leur durée. Une organisation des activités de maintenance est prise dans ce travail comme suit (voir tableau 1.1):

<i>Niveau (TPM)</i>	<i>Niveau (AFNOR)</i>	<i>Type de travail</i>	<i>Personnel concerné</i>	<i>moyens</i>
Niveau I	1	Réglage simple d'équipements accessibles sans démontage. échange d'éléments.	Opérateur système sur place.	Outillage léger défini dans la notice d'utilisation.
	2	Réparation ou dépannage par échange standard. Opérations simples de prévention.	Technicien habilité sur place.	Outillage standard et pièces de rechange situés à proximité.
Niveau II	3	Identification d'origines de pannes. échange de composants fonctionnels.	Technicien spécialisé, sur place ou en atelier de maintenance.	Outillage et appareils de mesure.
	4	Travaux importants de maintenance préventive et corrective. Révision.	équipe encadrée par un technicien spécialisé, en atelier central.	Outillage général et spécialisé.
Niveau III	5	Travaux de rénovation, de reconstruction et de réparations importantes, confiés aux sous-traitants.	équipe polyvalente complète, en atelier central.	Moyens importants proches de ceux du constructeur.

Tableau 1.1. « Niveaux de maintenance » (Monchy, 2000[47]).

- **Niveau I** : correspond à une maintenance de première ligne qui est transférée progressivement aux opérateurs de production, assistés si nécessaire par les techniciens de maintenance.
- **Niveau II** : représente le domaine d'action des équipes polyvalentes de techniciens de maintenance. Les tâches englobent aussi bien les opérations correctives que

préventives (diagnostic, dépannage, réparation, remplacement, test, révision, mise en œuvre d'améliorations, etc.).

- **Niveau III** : dédié aux travaux spécialisés (rénovation, reconstruction, . . .) souvent externalisées pour que la maintenance puisse recentrer ses moyens sur son savoir-faire défini au niveau II.

1.2.9 Méthodologie de la maintenance centralisée

La maintenance centralisée assure la cohérence de l'ensemble des diverses activités dispersées entre les sites de production et de l'atelier central, et effectué par des techniciens de qualifications différentes. Elle est assurée par le bureau des méthodes, mais aussi par l'existence d'un atelier central de maintenance regroupant des installations fixes et de taille importante, de moyens de test, d'un personnel qualifié et d'un stock de pièces de rechange.

La maintenance centralisée assure :

- L'optimisation des ressources de maintenance nécessaires ;
- La surveillance d'exécution des activités par une assistance technique d'une manière conforme ;
- Le retour d'expérience par un suivi continu de l'état des équipements et de leur échec, et donc une meilleure maîtrise des temps opératifs et des coûts engendrés ;
- Une normalisation des procédures et des taux de communication interne ;
- Une meilleure gestion du personnel et du magasin de stock de pièces de rechange.

1.2.10 Conclusion

Une attention particulière se doit d'être portée sur la mise en place d'une politique de maintenance adéquate en fonction de l'activité de l'entreprise et de ses potentiels de développement, et ceci afin de répondre aux besoins des consommateurs et augmenter sa rentabilité.

Rappelons que les fonctions de l'atelier de maintenance sont réparties entre les services méthode de maintenance, où le responsable du service se doit d'acquérir la maîtrise des événements liés au cycle de production et aux éventuelles perturbations ; service décision et ordonnancement qui est chargé de définir les tâches à effectuer par le service réalisation. C'est dans ce dernier service que sont regroupés tous les appareils (ou postes) permettant de réaliser les différentes phases de maintenance (test et diagnostic, désassemblage, assemblage, calibration, etc.), avec les ressources humaines qualifiées et les ressources matérielles.

2 Chapitre II

Maintenance Distribuée : Concepts ; Évaluations ; Mise en œuvre

.....

La maintenance distribuée est une des formes de maintenance pratiquée dans une entreprise. Le choix de cette approche est propre à des entreprises ayant plusieurs sites de production dispersée dans une zone géographique.

Dans le présent chapitre, un développement est consacré à la présentation de cette approche de maintenance, ses objectifs, son évaluation ainsi que les mécanismes de fonctionnement. Des exemples sont présentés dans le chapitre suivant afin de proposer et d'optimiser les coûts de différents scénarios existants.

L'implantation du concept de la maintenance distribuée dans une entreprise manufacturière de multi-sites offre plusieurs avantages (PHAM D.M, 2005[49]). En l'appliquant, l'entreprise réalise le processus de maintenance d'une manière plus intelligente, rapide et efficace. Aussi, elle profite d'un système d'information adéquat et d'un suivi rigoureux des opérations en temps réel. Ceci, lui permet d'avoir une architecture cohérente et efficace du système de maintenance ainsi que la maîtrise de l'outil de production.

Par ailleurs, la maintenance distribuée permet de diminuer les arrêts aléatoires, de maîtriser la chaîne logistique, de gérer intelligemment et efficacement les ressources humaines et matérielles et de profiter d'une économie d'échelle ainsi que d'une expertise externe et de la flexibilité.

Nous retrouvons le concept de la maintenance distribuée dans certaines applications militaires (BUTLER, 2001[14]), (CAHLINK, 2001[16]), et médicales (Riley et Smith, 2001[52]) et dans des projets de recherche comme le projet REMAFEX (Léger et *al.*, 1999[41][52]). Ce projet a été initié par l'Université de Nancy en 1996 en collaboration avec des entreprises françaises, portugaises et belges (SEMA GROUP, CCIL LYON SATOLAS, CRAN, EDF, etc.). L'objectif de ce projet est de créer un système pouvant faire face à des lacunes des systèmes de surveillance et de la maintenance des entreprises géographiquement distribuées.

Dans le contexte de maintenance distribuée nous pouvons citer aussi (un exemple d'un cas industriel) l'implantation, en Tunisie, d'une unité de maintenance dont les ressources sont partagées entre différents hôtels de la région, par une entreprise française spécialisée en maintenance industrielle des installations hôtelières.

Toutefois, il est relevé un manque d'outils permettant au gestionnaire de choisir la meilleure option (planification) stratégique de gestion des processus de maintenance distribuée. Nous essayons, dans cette thèse, de remédier à cette carence en donnant un outil qui oriente et aide le décideur (le manager) face à la complexité inhérente au partage des ressources.

2.1 La Maintenance Distribuée en réseau

La maintenance distribuée supporte différentes structures en vision réseau. En effet, l'entreprise peut faire partie d'un réseau d'entreprises qui se partagent une unité de maintenance (Figure 2.1). Dès que, cette dernière est installée et que les liens entre elle et les entreprises commencent à prendre forme, un autre lien entre les différents membres du réseau (les SdP et l'AdMc) s'établit. Ce lien est réalisé dans cette thèse par un Atelier de Maintenance Mobile AdMm.

La mutualisation des ressources et compétences contribue efficacement à la minimisation de coût. En effet, si pour un processus de maintenance déterminé, la ressource humaine existant dans l'entreprise X est partiellement inexploitée et est qualifiée à réaliser un processus de maintenance dans l'entreprise Y, sachant que cette dernière a une ressource humaine inexploitée et qualifiée pour réaliser un processus de maintenance dans l'entreprise X, le regroupement de ces ressources permet de créer une seule unité de maintenance (l'AdMc) qui effectue l'ensemble des tâches de maintenance sur les différents SdP.

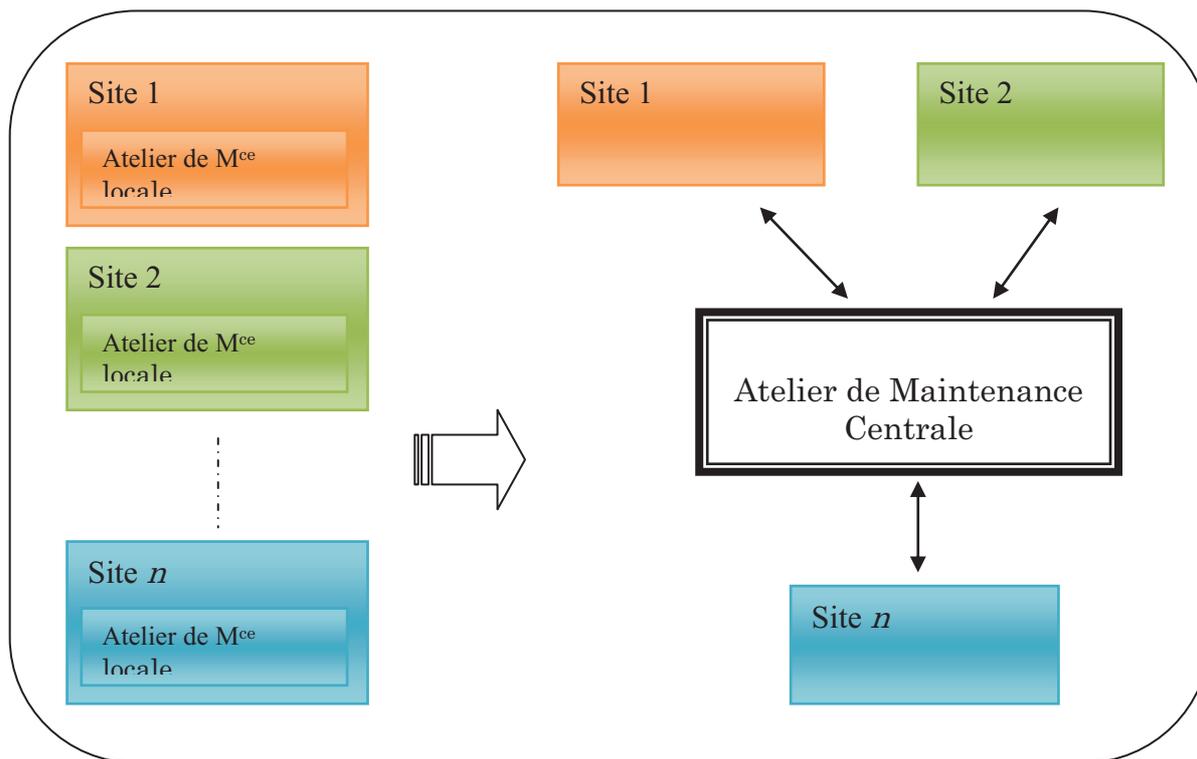


Figure 2.1 La création d'une unité de maintenance centrale à partir des unités de maintenance des entreprises manufacturière

Ce que nous proposons dans ce qui suit est de doter les gestionnaires des éléments leur permettant de dépasser le cadre théorique de la maintenance distribuée vers une application facile à utiliser par chaque gestionnaire dans son entreprise quel que soit son champ d'action.

2.2 Le concept de la Maintenance Distribuée

Dans cette thèse, nous définissons la maintenance distribuée comme une approche de mise en œuvre de la maintenance, basée sur l'analyse des activités et des ressources communes pour un système composé de plusieurs sites de production dispersés dans une zone géographique selon une approche réseau où les distances entre-sites sont importantes.

L'architecture de ce système est composée d'un ensemble qualifié (interne ou externe) de processeurs humains, matériels et informationnels, en vue de réaliser un ensemble de processus (activité de maintenance). Il est à noter que l'analyse des impacts techniques, stratégiques et économiques permet de sélectionner les couples processus – processeur (une tâche et ses ressources).

Dans le cadre de cette thèse, nous considérons, selon (LEFRANÇOIS, 1998[40]) et (VERNADAT, 1999[64]) que :

Un processus de maintenance distribuée (opi) est un ensemble d'activités élémentaire, reliées selon certaines contraintes de précedence, déclenchées par des

événements, réalisées par des ressources et initiées par des stimuli, de façon à améliorer la compétitivité de l'entreprise.

Soit (Π) l'ensemble des processus op_i inhérents au système de maintenance.

$\Pi = \{op_1, op_2, \dots, op_n\}$ pour un processus composé de n opérations élémentaires. □

Le processeur de maintenance distribuée (P_i) est composé des ressources humaines RH_{ij} , des ressources matérielles RM_i , d'un système d'information SI_i , et des pièces de rechange PR_i . P_i est le processeur requis pour op_i . C'est un ensemble de ressources visant la réalisation du processus op_i . Ces ressources peuvent être comme un support pour exécuter un ou plusieurs processus. (LAKHAL S., et al. 1999[39]) désignent les processeurs comme des ressources durables par opposition à des ressources consommables.

Donc, pour une opération élémentaire op_i , on associe le processeur :

$$P_i = \{RH_{ij}, RM_i, SI_i, PR_i\}$$

Ce processeur est défini par:

- La ressource humaine RH_{ij} qui est l'opérateur j nécessaire à la réalisation d'un ou plusieurs processus op_i .
- La ressource matérielle RM_i est l'outillage nécessaire pour la réalisation de l'opération op_i .
- Le système d'information SI_i est le support du flux d'information requis ou résultant de la réalisation du processus de maintenance op_i ;
- Les pièces de rechange PR_i sont les composantes neuves ou réparées, pour maintenir ou rétablir un site de production en état d'opération. Elles sont stockées soit au niveau de l'AdMc (au stock de la sortie), soit dans le stock de l'AdMm.

*/Remarque :

Dans le cadre de cette thèse, et au niveau des hypothèses, il n'y a aucune ressource partagées entre la production (au SdP) et la Maintenance. □

2.3 Mise en œuvre d'un système de Maintenance Distribuée

Sans connaître l'état des installations des Sites de Production, nous ne pouvons mettre une gestion efficace de la maintenance. Donc, il est nécessaire d'avoir d'abord les distances entre-sites du système de production, les distances entre ces sites et l'Atelier de Maintenance centrale AdMc, les ressources disponibles, les pièces de rechange, les processus de maintenance déjà implantés et les priorités accordées aux machines dans les sites de production et leur criticité.

A cet effet, une méthodologie en quatre phases (voir Figure 2.2) :

Phase 1 : Acquisition des données concernant les informations sur le système de production et de sa maintenance ;

Phase 2 : Génération des scénarios pour le routage de l'atelier Mobile

Phase 3 : Filtrage technique et stratégique des scenarios.

Phase 4 : Évaluation et aide à la décision.

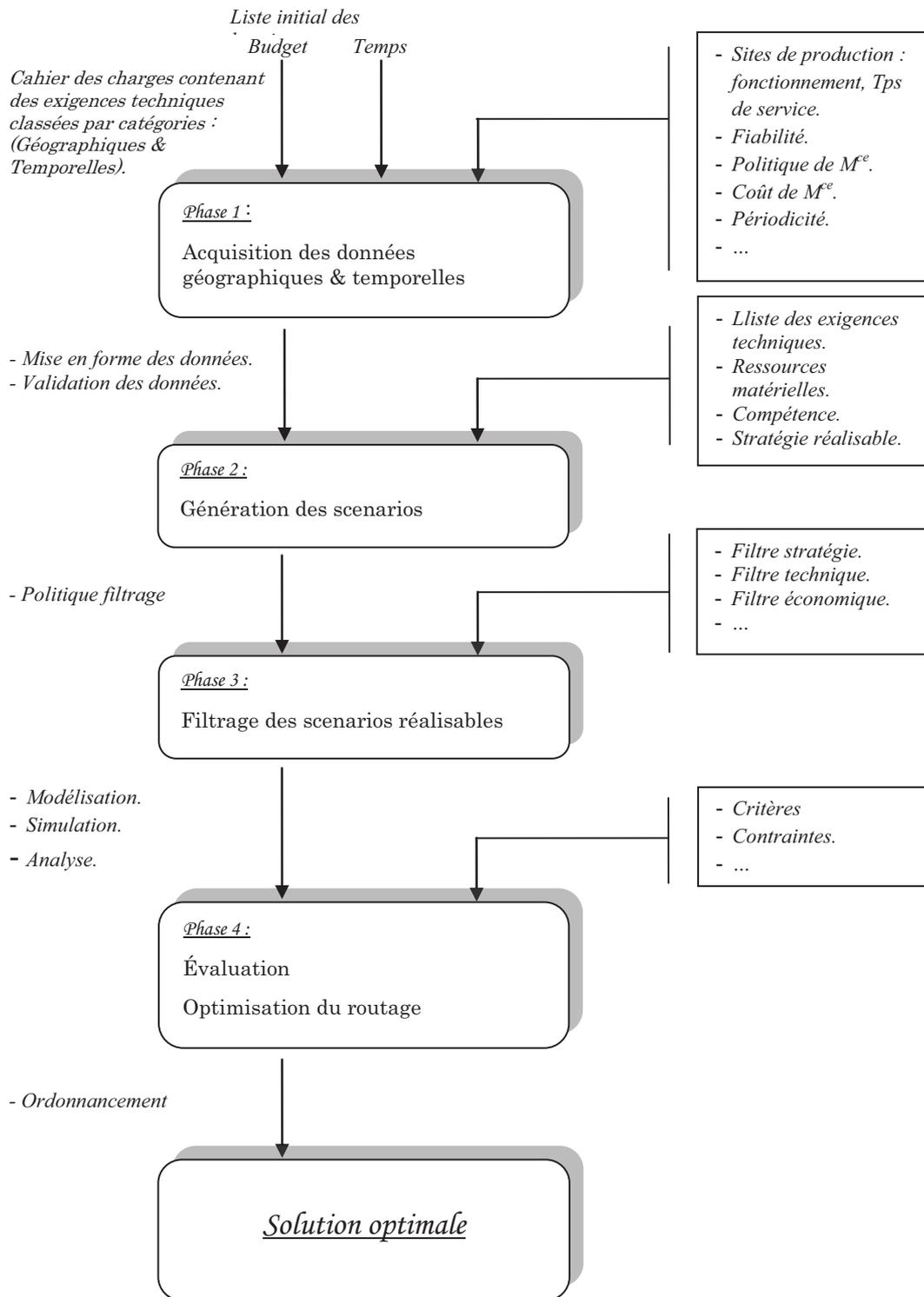


Figure 2.2 Méthodologie de mise en œuvre de la Maintenance Distribuée

2.3.1 Phase 1 : L'acquisition des données

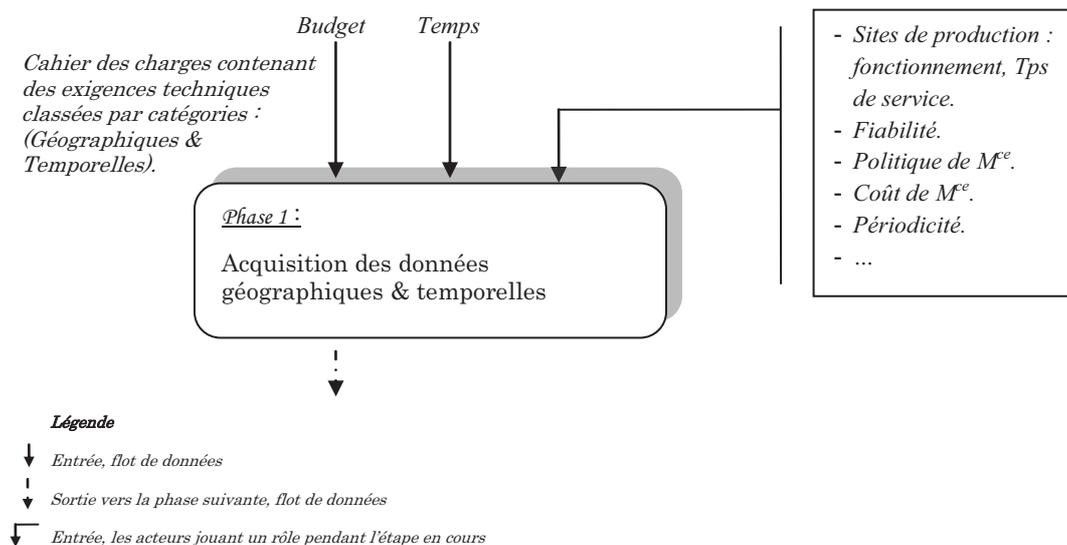


Figure 2.3 Méthodologie de la MD, phase 1

Les données nécessaires concernent plusieurs aspects de la production et de la maintenance :

- Dans un premier temps, il est nécessaire de prendre connaissance de Site de Production concernée. Il est important de connaître :
 - Les caractéristiques de fonctionnement (saisonnier ou continu), l'horaire de travail (nombre de plages de travail), le temps d'un cycle de production (le temps moyen de service, et le temps moyen de chargement/déchargement).
 - Les caractéristiques de fiabilité du SdP : le temps moyens de panne, les dates d'occurrence de la Maintenance Préventive, le temps moyen de réparation (MC) et le temps moyen de remplacement (MP).
- Dans un deuxième temps, nous prenons connaissance de la politique de Maintenance appliquée de l'entreprise ainsi que de la structure organisationnelle de la fonction maintenance. Il s'agit de l'organigramme de la fonction maintenance et des ressources humaines qui sont affectées. Pour chaque ressource humaine, il faut connaître les champs d'expertise et d'action et l'expérience dans les interventions de maintenance.
- Dans un troisième temps, nous évaluons le coût associé à la maintenance locale pour l'ensemble de SdP.

2.3.2 Phase 2 : La génération des scénarios

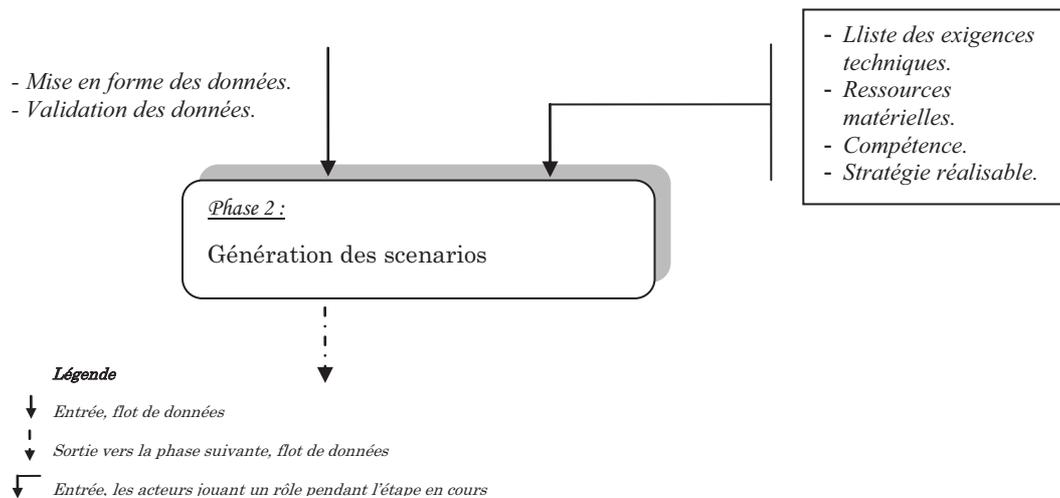


Figure 2.4 Méthodologie de la MD, phase 2

Les étapes permettant la génération de systèmes de processeurs en mesure de réaliser techniquement le processus op_i de maintenance sont les suivants :

Étape 1 : Étude de la procédure d'exécution

Cette procédure détermine les ressources matérielles, les pièces de rechange et les compétences requises pour mettre en œuvre l'activité de maintenance en question.

Étape 2 : Analyse de la documentation technique

Il est nécessaire de prendre tous les documents techniques relatifs à ce processus. Ceci permet de choisir les ressources humaines adéquates à exécuter l'intervention, et de mettre une liste de conditions sur les sites de production qui seront pris en charge dans l'application.

Étape 3 : Analyse et choisir des ressources et des sites de production.

Il est dégagé, à partir de la documentation technique, et la liste de condition à prendre en compte sur les sites de production consultées lors des étapes 1&2, une liste des ressources humaines et une liste des sites de production. En conséquence, une liste identifie les sites et les ressources prises en compte, ainsi qu'une vérification de la disponibilité des ressources matérielles en fonction de leur utilisation dans la maintenance est établie.

Étape 4 : Génération des scénarios techniquement réalisables

Cette étape permet, à partir des hypothèses citées et des résultats des étapes précédentes, de générer des scénarios techniquement réalisables.

Des variables binaires sont utilisées pour déterminer les différents scénarios techniquement réalisables. Elles permettent d'exprimer les contraintes sur les ressources à satisfaire. Nous présenterons ces variables comme suit :

- Y_1 : l'état de la ressource humaine (disponible ou pas),
- Y_2 : l'état de la ressource matérielle (disponible ou pas),
- Y_3 : l'état de la pièce de rechange (disponible ou pas),
- Y_4 : l'état de l'Atelier de Maintenance Mobile (AdMm), arrivée au SdP, (disponible ou pas)
- Y_5 : l'état de la date de maintenance préventive (occurrence d'une date de MP ou pas),
- Y_6 : l'état de site de production en panne (présence d'une panne ou pas),

Si la ressource ou la pièce est disponible, l'état pour les différentes ressources et pièces de rechange prend la valeur « 1 » et dans le cas contraire, il prend la valeur « 0 ».

Afin qu'un processus de maintenance préventive (remplacement) se déroule, la condition (2.1) doit être satisfaite, stipulant qu'afin de réaliser la maintenance préventive, à l'occurrence de la date de MP, les ressources humaines, matérielles et pièces de rechange doivent être, à la fois, disponibles au niveau du SdP.

$$Y_1 Y_2 Y_3 Y_4 Y_5 = 1 \quad (2.1)$$

Pour qu'un processus de Maintenance Corrective (MC) puisse se réaliser au niveau d'un site de production, il faut que la condition (2.2) soit remplie, stipulant qu'une activité de MC sur un SdP s'effectue, si le SdP tombe en panne, et les ressources humaines, matérielles et pièces de rechange doivent être, à la fois, disponibles au niveau du SdP.

$$Y_1 Y_2 Y_3 Y_4 Y_6 = 1 \quad (2.2)$$

En cas particulier, où l'occurrence d'une date de MP arrive en même temps qu'une panne au niveau de même SdP, on rajoute la condition (2,3) qui doit être remplie.

$$Y_1 Y_2 Y_3 Y_4 (Y_5 + Y_6) = 1 \quad (2.3)$$

Si un processus de maintenance peut se réaliser sans l'une des ressources, sans matérielle par exemple, on prend la valeur de la variable correspondance « 1 » pour toujours, c.à.d. elle est toujours disponible. Il est à rappeler, ici, que la maintenance concernée est la maintenance préventive (remplacement) et les ressources en question sont les ressources de l'Atelier de Maintenance Mobile. Dans ce cas, les conditions (2.4) et (2.5) doivent être remplies, afin que la maintenance soit réalisée.

$$Y_1 + Y_2 \geq 1 \quad (2.4)$$

$$Y_5 + Y_6 \geq 1 \quad (2.5)$$

La condition (2.4) stipule qu'une des ressources humaines ou matérielle doit être disponible. Dans le cas où il n'y a pas de ressource humaine, celle-ci remplacée par des Robots qui sont considérés souvent comme des ressources matérielles.

La condition (2.5) stipule que le remplacement (la MP) s'effectue soit à l'occurrence d'une date de MP ou à la présence d'une panne.

De l'ensemble des relations de (2.1) à (2.5) on extrait une condition indispensable qui est la condition présentée par la relation (2.6). Cette condition stipule que nous ne pouvons établir une activité de maintenance sans la présence de l'AdMm au niveau du SdP et sans des pièces de rechange disponible dans le Stock de l'AdMm.

$$Y3 Y4 = 1 \quad (2.6)$$

Cependant, il est à préciser que la sélection des scénarios ne peut pas se faire uniquement avec le critère technique. Elle est liée aussi à des critères stratégiques et économiques, que nous allons exposer dans la suite. Ces filtres nous permettent d'ajuster le tir et de raffiner la sélection d'un scénario.

2.3.3 Phase 3 : Le filtrage des scénarios proposés pour la Maintenance Distribuée

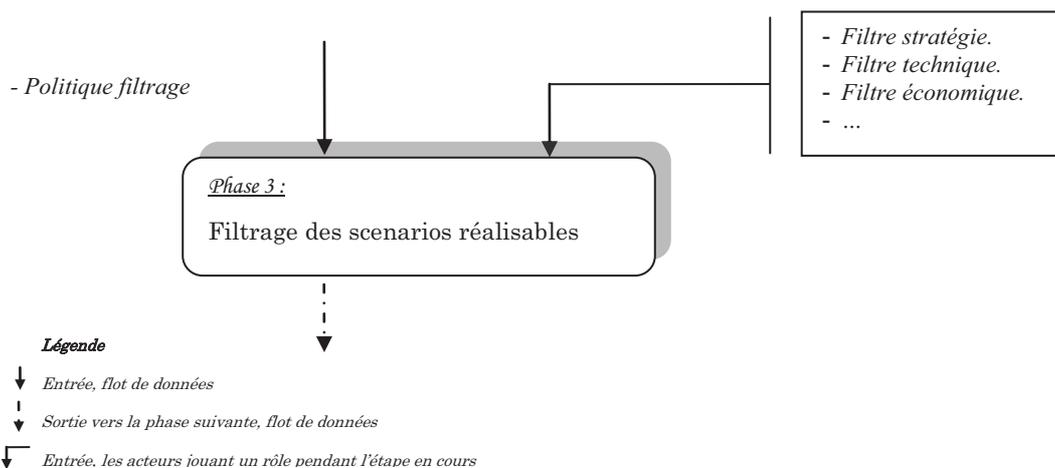


Figure 2.5 Méthodologie de la MD, phase 2

Pour l'implantation d'un système de maintenance, nous proposons un ensemble de filtres, la figure suivante (Figure 2.6), permet au gestionnaire de la fonction maintenance de prendre un choix éclairé pour l'option stratégique de gestion de chaque activité de maintenance.

Le premier est un filtre **technique**. Il permet, à partir des caractéristiques techniques, d'identifier les ressources nécessaires au bon accomplissement de l'activité de Maintenance. Un ensemble de scénarios techniquement réalisables est obtenu.

Le deuxième filtre est de **nature stratégique**. Il consiste à faire une analyse stratégique des ressources et à caractériser le lien entre celles-ci et l'ensemble de sites de production. Ce lien est basé sur des décisions stratégiques de choisir la solution à faire

de la vue du problème de la stratégie de la maintenance. En répondant aux questions guidées par la caractérisation stratégique des scénarios, il est possible de différencier entre un scénario stratégiquement réalisable ou non.

Le troisième est un filtre **économique**. Il consiste à chiffrer les scénarios obtenus en calculant une fonction de coût.

Toutefois, il convient de noter qu'il est possible d'avoir une émergence de nouveaux scénarios lors de l'analyse stratégique et/ou économique suite à une meilleure connaissance technique. Ces étapes sont détaillées, dans ce qui suit, et la figure suivante (Figure 2.6), montre la méthodologie de conception du système de maintenance distribuée.

2.3.3.1 Le filtrage Technique

Le générateur des scénarios prend toutes les probabilités possibles de faire un parcours de l'AdMm, avec la disponibilité des ressources.

Plusieurs données nécessaires pour la génération des parcours possibles concernent trois volets : la disparité des distances entre les sites de production, les distances entre ces sites de production et le site de l'Atelier de Maintenance Centrale, et le niveau de priorité de visiter du site de production.

A titre de simplification, nous considérons que tous les sites de production sont identiques et ont la même priorité. Donc, la seule variable qui reste, ce sont les distances entre-sites et entre les SdP et l'AdMc.

Plus de détails sur le mécanisme de générer les scénarios seront présentés dans le chapitre 5, et à l'application.

2.3.3.2 Le filtrage Stratégique

Dans l'étape précédente, nous avons généré les parcours possibles à réaliser. Dans cette étape, nous analysons stratégiquement ces parcours en posant des questions similaires (de même genre) comme :

- Quel risque nous allons rencontrer avec ce scénario (fiabilité du parcours) ?
- On favorise un chemin sur d'autre d'une raison de la sécurité ?
- Est-ce que l'AdMm reste joignable et surveillé sur la longueur de ce parcours ?
- ...

Cette analyse stratégique est dédiée à la détermination des critères d'évaluation permettant de synthétiser, spécifier et ensuite, filtrer stratégiquement les parcours proposés par l'étape 1, afin de prendre une décision stratégique pour le parcours.

Il est à signaler que ces questions ne sont pas exhaustives. Chaque entreprise est libre de poser ses propres questions, selon sa stratégie.

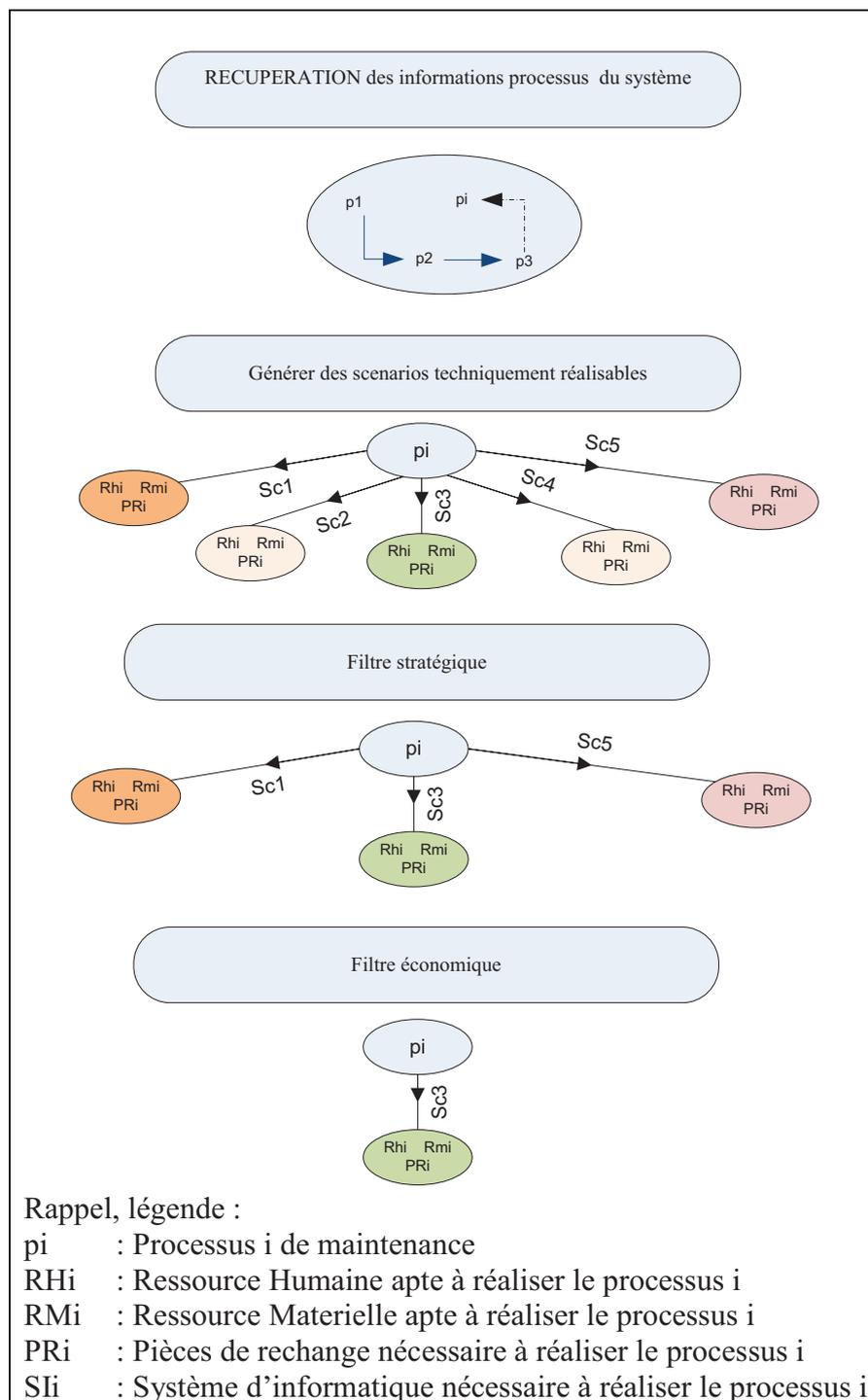


Figure 2.6 La méthodologie de conception du système de Maintenance Distribuée.

2.3.3.3 Etape Synthèse

Cette étape est une synthèse des deux étapes précédentes. Une fois que les contraintes et les hypothèses sont déterminées pour chaque activité de maintenance, on peut compléter le tableau suivant :

Parcours	Techniquement possible	Filtre Stratégique	admis
Parcours 1	1	1	1
Parcours 2	0	x (not care)	0
.....
Parcours i	1	0	0
Parcours n	1	1	1

Seuls les parcours admissibles sont évalués dans la phase de filtrage économique. Ce sont les parcours techniquement possibles et stratégiquement réalisables.

2.3.3.4 Le filtre économique

Dans le filtrage économique, les modèles classiques de calcul de la fonction coût de maintenance que l'on trouve dans la littérature sont utilisés.

Ces modèles sont basés, d'une part, sur la fiabilité et la disponibilité des systèmes et d'une autre part, sur la théorie du cycle de vie.

La moyenne de vie résiduelle à l'instant t_0 a été définie par [Rausand et Reinertsen, 1997[51]] comme suit :

$$MRL(t_0) = \int_0^{\infty} \frac{R(t + t_0)}{R(t_0)} dt \quad (2.7)$$

Où :

$R(t)$: la fonction de fiabilité.

Plusieurs paramètres de fonctionnement peuvent être déterminés à partir de cette définition, comme la fonction densité de probabilité, la fiabilité et la moyenne de temps de fonctionnement.

(Andersen et Rasmussen 1999[11]) ont présenté un modèle de calculer le coût de maintenance en se basant sur la durée de vie résiduelle. En prenant en compte les hypothèses suivantes :

- l'intervention préventive n'altère pas l'état de fonctionnement du système sur lequel elle a eu lieu.
- lorsqu'un composant subit une intervention, son état devient *as good as new*.
- l'horizon de temps est supérieur à la durée de vie résiduelle.
- les différents composants d'un système sont économiquement indépendants.

À partir de la durée moyenne résiduelle, la fonction coût du composant à l'instant t_r est donnée par l'expression suivante, nous la modifions pour qu'elle soit adaptée à notre cas d'étude :

$$C(t_r) = P(t_r) \frac{\int_{t_0}^{t_r} f(t) \cdot [CCD(t) + CCR(t) + \int_0^t c_0(u) du] dt}{\int_{t_0}^{t_r} f(t) dt} + R(t_r) \left[CPD(t_r) + CPR(t_r) + \int_{t_0}^{t_r} c_0(t) dt \right] \quad (2.8)$$

Avec:

- $P(t_r)$: la probabilité de défaillance du SdP avant le temps t_r ,
- $R(t_r)$: la probabilité de survie du SdP jusqu'au temps t_r ,
- $f(t)$: la fonction densité de probabilité déduite à partir de la durée moyenne résiduelle,
- $CCD(t)$: le coût du temps d'arrêt dû à une intervention de maintenance corrective MC,
- $CPD(t)$: le coût du temps d'arrêt dû à une intervention de maintenance préventive MP,
- $CCR(t)$: le coût des ressources associées à la maintenance corrective,
- $CPR(t)$: le coût des ressources associées à la maintenance préventive,
- Le facteur $c_0(u)$ est une somme des coûts d'énergie, des pertes et des coûts de maintenance mineure en fonction du temps.

Ceci nous permet de calculer une périodicité de remplacement préventive et le coût associé. Cependant, le modèle permet le calcul de la fonction coût de maintenance sans son optimisation, et ne tient pas compte du processus d'apprentissage.

Parmi les modèles mathématiques et statistiques d'optimisation du coût de la fonction maintenance basés sur les informations de maintenance, nous citons le modèle de (Löfsten 99[42]), qui permet de minimiser le coût de maintenance incluant l'aspect préventif et correctif, et de choisir la meilleure alternative de maintenance.

Quatre hypothèses concernent ce modèle :

- 1) Lorsqu'un composant subit une intervention préventive, son état devient *as good as new*.
- 2) le changement d'un composant se fait par une nouvelle pièce.
- 3) lorsqu'une panne survient, le composant est remplacé sans délai.
- 4) Le coût de maintenance corrective augmente en fonction du temps entre deux interventions de type préventif.

Nous traitons le cas d'un SdP qui possède une durée de vie T . Au cours de cette durée, nous contrôlons le composant n fois. La durée $t = T/n$ entre chaque inspection est constante (durée calculée par la stratégie de type âge ou bloc).

La fonction à minimiser est la suivante :

$$\text{Min}_{PM_t, T} C_{tot} = \sum_{t=1}^T \frac{C_t(PM_t, CM_t, S_t)}{(1+i)^t} \int_0^{\infty} \frac{R(t+t_0)}{R(t_0)} dt \quad (2.9)$$

Sujet à :

$$S_t = f_a(S_{t-1}, PM_t, CM_t, \text{facteur d'arrêt}), t = 1, 2, \dots, T \quad (2.10)$$

$$S_t \geq S_{min}, t = 1, 2, \dots, T \quad (2.11)$$

$$S_0 = \text{constante} \quad (2.12)$$

$$CM_t = f_b(S_{t-1}, \text{facteur d'arrêt}), t = 1, 2, \dots, T \quad (2.13)$$

Avec:

C_{tot} : le coût total de maintenance sur la durée de vie,

C_t : le coût total de maintenance à la période t ,

T : la durée de vie du composant,

t : la périodicité de remplacement préventive,

i : le taux d'amortissement,

PM_t : le coût de maintenance préventive dans la période t ,

CM_t : le coût de maintenance corrective dans la période t ,

S : l'état du composant,

S_{min} : l'état minimum requis pour le composant,

f_a : la fonction qui détermine l'état du composant en fonction de l'état précédent et des coûts de maintenance préventive et corrective et les facteurs de panne,

f_b : la fonction qui détermine le coût de maintenance corrective du composant en fonction de l'état précédent et des coûts de maintenance préventive et corrective et les facteurs de panne,

Ce modèle présente une technique d'optimisation du coût de maintenance sur un espace de temps déterminé en se basant sur les caractéristiques de l'équipement comme la durée de vie et la périodicité d'inspection préventive. Toutefois, ce modèle ne prend pas en considération les pièces de rechange ainsi que le processus d'apprentissage, de plus, le coût d'attente où il considère que le remplacement se fait sans délai, et les pertes (de matière et d'énergie) dues à un arrêt préventif ou correctif ne sont pas prises en considération. Par conséquent, le modèle est statique.

Un modèle est basé sur le cycle de vie d'un composant, dont l'analyse de son coût constitue un outil relativement riche pour le choix de la meilleure alternative de conception d'un système (BLANCHARD B.S., 1986[13]). Ce coût est déterminé par la fonction suivante (équation (2.14)) qui inclut toutes les étapes de cycle de vie à savoir conception, acquisition, opération, utilisation, recyclage et destruction :

$$C = C_R + C_I + C_O \quad (2.14)$$

Où :

Mise en œuvre d'un système de Maintenance Distribuée

C_R : le coût de recherche et développement
 C_I : le coût d'investissement
 C_O : le coût d'opération et de maintenance.

Le coût C_O d'opération et de maintenance est déterminé par l'équation (2.15). Cette fonction est associée avec tous les aspects d'opération et de maintenance durant le cycle de vie d'un produit, depuis sa création jusqu'à sa destruction :

$$C_O = C_{OO} + C_{OM} + C_{ON} + C_{OP} \quad (2.15)$$

Avec :

C_{OO} : le coût d'opération du composant.
 C_{OM} : le coût de maintenance du composant.
 C_{ON} : le coût de modification du composant.
 C_{OP} : le coût de destruction du composant.

La fonction coût de maintenance, la partie la plus importante dans le cycle de vie du produit, est détaillée dans l'équation (2.16). Elle comprend :

- Les pièces de rechange,
- Les équipements de réparation et de test des composants,
- Le transport et la manutention,
- Le réapprovisionnement,
- Le système d'information et de support des activités.

Cette fonction coût est applicable pour les activités de maintenance préventive et corrective.

$$C_{OM} = C_{OMM} + C_{OMX} + C_{OMS} + C_{OMT} + C_{OMP} + C_{OMF} + C_{OMD} \quad (2.16)$$

Avec

C_{OMM} : le coût de personnel de maintenance.
 C_{OMX} : le coût des pièces de rechange.
 C_{OMS} : le coût des équipements de test.
 C_{OMT} : le coût de transport et de manutention
 C_{OMP} : le coût de formation et d'apprentissage.
 C_{OMF} : le coût d'équipement de maintenance.
 C_{OMD} : le coût des données techniques.

C_{OMM} : coût du personnel de maintenance, il constitue des coûts :

- salaire du personnel qui réalise la maintenance préventive ou corrective,
- le matériel associé à ce personnel

- la documentation nécessaire pour la réussite de cette intervention.

La formation et l'apprentissage ainsi que les coûts des équipements de maintenance ne seront pas couverts dans cette équation.

Le coût de maintenance corrective ou préventive comporte le salaire du personnel pour le temps nécessaire pour l'accomplissement de la tâche de maintenance.

C_{OMX} : coût des pièces de rechange, il constitue des coûts :

- pièces de rechange d'organisation,
- pièces de rechange de transport et de manutention
- pièces de rechange d'outillage de maintenance
- pièces de rechange des machines de production et les consommables

C_{OMS} : coût des équipements de test et de maintenance, il constitue des coûts :

- équipements de test et de maintenance
- équipements de transport et manutention
- outillage de test et de maintenance

C_{OMT} : coût de transport et de manutention. Il comporte même le coût du déballage et du stockage de pièces de rechange.

C_{OMP} : coût de formation et d'apprentissage, qui comporte l'aspect relatif à la formation du personnel et le salaire de l'instructeur ainsi que la rémunération des personnes qui suivent la formation et l'apprentissage.

C_{OMF} : coût d'équipement de maintenance, qui comporte l'aspect coût et espace dédié entièrement pour la maintenance, l'aspect relatif au coût des machines et de l'espace qui sont partagés entre la production et la maintenance.

C_{OMD} : coût des données techniques, qui comporte le coût de toute structure nécessaire au maintien de l'information sur la composante depuis sa réception.

Il est à noter que, tous les coûts composants de la fonction coût se calculent de la même manière.

Tout en nous inspirant des différents modèles existants, nous proposons une fonction coût de maintenance propre à notre contexte,

2.3.3.5 Le modèle économique

Nous proposons une fonction coût de maintenance propre à notre contexte, qui prend en compte nos différents critères. Il est à rappeler que le calcul du coût de maintenance est un des critères de choix des scénarios de routage. Sur l'ensemble de scénarios générés par l'étape 2, ce calcul est pris en compte dans le modèle d'aide à la décision pour la gestion des processus de maintenance.

Dans un premier lieu, nous considérons un ensemble d'hypothèses, et nous détaillons toutes les composantes de cette fonction.

Notre modèle est basé sur les hypothèses liées au fonctionnement et au coût :

- 1) les interventions préventives arrêtent la production.
- 2) Une présence d'une panne, n'est pas prise en compte sauf au moment de sortir d'un SdP en cours de servir (phénomène d'attente).
- 3) Les dates de MP systématiquement déterminées à partir des données techniques et historiques.
- 4) le taux de panne est supposée connue ou bien la fonction densité de probabilité ou la fiabilité du SdP.
- 5) Les coûts des actions de maintenance préventives et correctives sont connus.

Pour notre cas d'étude, nous utilisons le modèle de calcul du coût de maintenance donné par l'équation 2.16, à laquelle on ajoute le coût lié au retard, soit l'équation (2.17) suivante :

$$C_{OM} = C_{OMM} + C_{OMX} + C_{OMS} + C_{OMT} + C_{OMP} + C_{OMF} + C_{OMD} + C_{ret} \quad (2.17)$$

Avec, C_{ret} : coût lié au retard dû à l'attente de l'AdMm.

Ce coût (C_{ret}), comporte tous les coûts relatifs au retard causé par l'attente de l'AdMm au niveau du SdP. Ce coût est calculé pour chaque retard de production d'un SdP. Il est indépendant des coûts de retard sur les autres SdP. La Figure 2.7 exprime cette notion de retard.

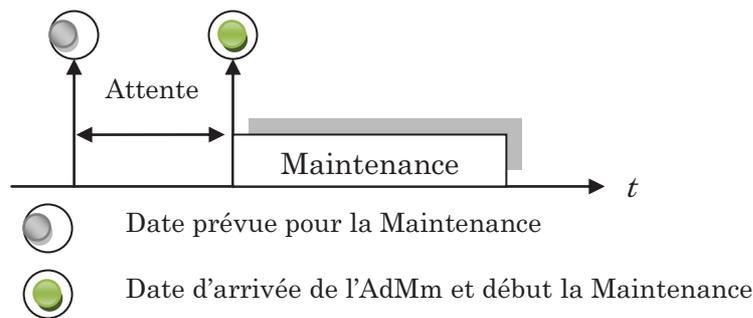


Figure 2.7 Présentation de la notion du temps d'attente

L'équation (2.17) permet de calculer le coût de la fonction maintenance dans le cadre d'estimation du coût de cycle de vie d'un SdP. Cette estimation permet de choisir entre deux stratégies de maintenance, d'une part garder l'Atelier de maintenance locale et faire la maintenance en interne, ou externaliser l'opération de maintenance.

Conclusion

Le chapitre traite du concept de la maintenance distribuée. Ce concept a été introduit, pour reformuler le fait de maintenance d'une façon adéquate pour un système ou une entreprise manufacturière possédant plusieurs sites de production. C'est un nouveau design qui nous permet d'architecturer en fonction des caractéristiques des sites existants, des ressources humaines et matérielles disponibles et de la politique de gestion d'entreprise. Ceci permet au gestionnaire de la maintenance de déterminer les nécessaires des processus de maintenance, et aussi leurs ressources nécessaires. Les critères de sélection d'un choix sont de nature technique, stratégique et économique.

Notre étude s'est appuyée sur les premières recherches, qui font état d'évaluation d'un système de maintenance permettant de déterminer à la fois l'impact technique, stratégique et économique d'une externalisation des différentes actions de maintenance dans un système manufacturier.

La fonction coût que nous avons exploitée, regroupe l'ensemble des coûts de maintenance (Figure 2.8.) comme les pièces de rechange, les coûts du personnel, les équipements de réparation et de test des composants, le transport et la manutention, le réapprovisionnement, la formation, le système d'information et de support des activités, les données techniques et les pertes suite à des arrêts (préventifs ou correctifs). Ceci est valide pour les activités de maintenance préventive et corrective.

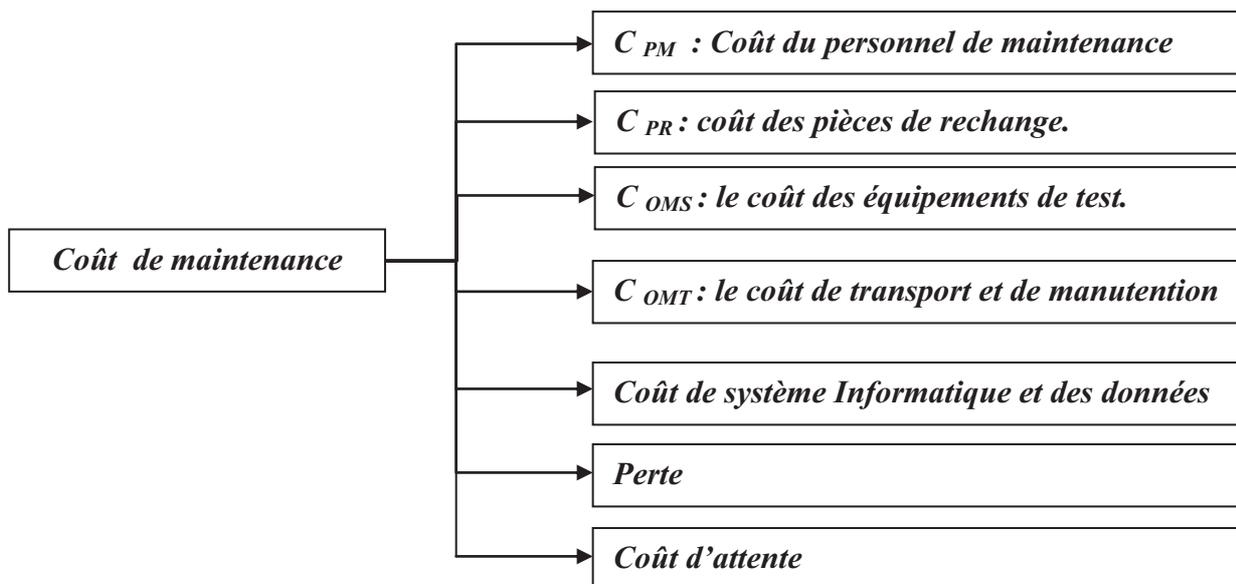


Figure 2.8 Structure de la fonction coût de maintenance distribuée

Pour la suite, le modèle le plus optimal sera choisi, par comparaison entre le système de maintenance existant et la maintenance distribuée proposé.

3 Chapitre III

Conception et Modélisation d'un réseau d'Atelier de Maintenance Distribuée



Dans une entreprise productive, la production et/ou les différentes phases de la maintenance (que ce soit correctives ou préventives) nécessitent des ressources dédiées à l'atelier. L'objectif est d'optimiser les ressources afin d'obtenir une certaine cohérence entre les ressources utilisées et les besoins de production. Ce dimensionnement contribue à la minimisation des coûts de maintenance

Comme il a été défini précédemment, un AdM est constitué d'un ensemble de ressources qui assurent la performance et la pérennité des machines de production. Les politiques d'évaluation des performances sont diversifiées selon la nature de l'atelier de maintenance dans deux cas de figures :

- Pour l'AdM central, nous prenons en compte le cas où la Maintenance Corrective seule est considérée. Dans ce cas, les performances de l'AdMc sont évaluées par un calcul analytique basé sur les réseaux de files d'attente. Ce travail a été réalisé par la thèse de R. ABBOU 2003[1].

- Pour l'AdM Mobile, on adopte d'abord la politique de Maintenance Préventive par remplacement. Des modèles de Réseaux de Petri Stochastiques Généralisées à Synchronisation Interne sont proposés. La simulation est utilisée pour le dimensionnement de l'AdM Mobile.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à l'évaluation des performances de l'atelier de maintenance en fonction de la taille des ressources dans le cas où seule la maintenance corrective est considérée.

3.1 Conception d'un atelier de maintenance

3.1.1 Rôle et objectifs

Un Atelier de Maintenance (AdM) est constitué d'un ensemble de ressources humaines et matérielles qui assurent la pérennité des machines de production,

L'AdM par son rôle correctif, détecte les défaillances existantes sur un équipement défectueux et procède au rétablissement de son fonctionnement (c'est la maintenance corrective).

Aussi, et afin de réduire l'occurrence des défaillances, il est programmé des interventions régulières (c'est la maintenance préventive)

Donc, l'objectif de l'Atelier de Maintenance « AdM » est de prévenir et d'empêcher l'arrêt du système de production et assurer à la machine une durée de vie plus longue avec des coûts d'intervention plus faibles.

Ce chapitre a été structuré de sorte qu'au début, un aperçu est donné sur l'intérêt d'un atelier de maintenance centrale. Ensuite, le deuxième point a été consacré à l'organisation structurelle traditionnelle d'un service de maintenance. Une présentation du processus de conception d'un atelier de maintenance a été abordée dans le troisième point suivi de l'amélioration de la disponibilité des machines.

3.1.2 L'intérêt d'une centralisation de la maintenance

La maintenance peut être, selon les systèmes de production sous trois formes : sous-traitée, intégrée ou centralisée. Certains coûts sont en communs pour ces trois types de production et d'autres sont spécifiques pour chaque type. Le tableau 3.1 (ABBOU R., 2003[1]) (FRANCASTEL J-C., 2001[27]) décompose ces coûts en trois catégories :

La catégorie « A », celle-ci représente les coûts de maintenance quand celle-ci est sous-traitée (coût du contrat avec le sous-traitant, le coût d'intervention pour une maintenance corrective et les frais de transport).

La catégorie « B » englobe les coûts communs entre les trois stratégies de maintenance appliquées et part du principe que le fait de considérer la maintenance en interne (intégrée ou centralisée) dans le système de production permet de réduire les temps d'indisponibilité, dus particulièrement aux temps d'attente pour une maintenance corrective.

Quant à la catégorie « C » représente les coûts d'investissement dans les ressources de maintenance.

		Types de coût	Maintenance sous-traitée	Maintenance intégrée	Maintenance centralisée
Catégorie A		Coût du contrat	+		
		Coût d'une maintenance corrective	+		
		Frais de transport	+		
Catégorie B		Arrêts de la production	+	+ ↘	+ ↘
		Coûts salariaux non bénéficiés	+	+ ↘	+ ↘
		Manque à gagner	+	+ ↘	+ ↘
		Pénalités de retard	+	+ ↘	+ ↘
		Dévalorisation des machines	+	+ ↘	+ ↘
		Atteinte de l'image de marque	+	+ ↘	+ ↘
Catégorie C	Site 1	Coûts des différents postes de maintenance		+ (à optimiser)	+ (à optimiser)
		Coûts des techniciens de maintenance		+ (à optimiser)	
		Coût des pièces de rechange et du stockage		+ (à optimiser)	
		
	Site N	Coûts des différents postes de maintenance		+ (à optimiser)	
		Coûts des techniciens de maintenance		+ (à optimiser)	
Coût des pièces de rechange et du stockage			+ (à optimiser)		

+ : coût pris en compte
 ↘ : coût qui a tendance à baisser

Tableau 3.1 Comparaison des coûts entre SdPs selon la stratégie de maintenance appliquée (FRANCASTEL J-C., 2001[27])

De ce fait, pour concevoir un atelier de maintenance, il est nécessaire de déterminer préalablement l'organisation structurelle du service maintenance à partir du cycle de réparation de l'ensemble des équipements qui passeront par l'AdM.

3.1.3 Organisation structurelle du service maintenance

Les étapes de réalisation d'une maintenance corrective, peuvent être structurées, d'une manière globale, par la Figure 3.1, où l'on constate 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, localisation, diagnostic et à la préparation pour l'intervention. 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.

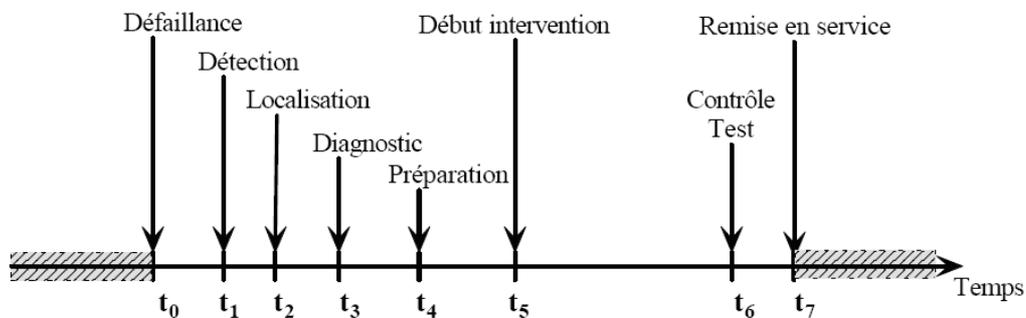


Figure 3.1 Processus de déroulement d'une maintenance corrective d'un équipement (ABBOU R., 2003[1])

Dans le cas d'intégration d'un Atelier de Maintenance AdM, le cycle de réparation d'un équipement défaillant d'une manière générale, illustrée par la Figure 3.2, est effectué sur les différents postes d'intervention selon le type de défaillance et la probabilité d'occurrence de cette défaillance.

Le passage d'un poste (i) vers un poste j s'effectue alors avec une probabilité de réparation p_{ij} sur le poste j ($i, j = 1, \dots, N, N$: étant le nombre de postes).

Les pièces défectueuses proviennent des SdP par l'intermédiaire de l'Atelier de Maintenance Mobile (AdMm). Seules les pièces déplaçables sont prises en charge.

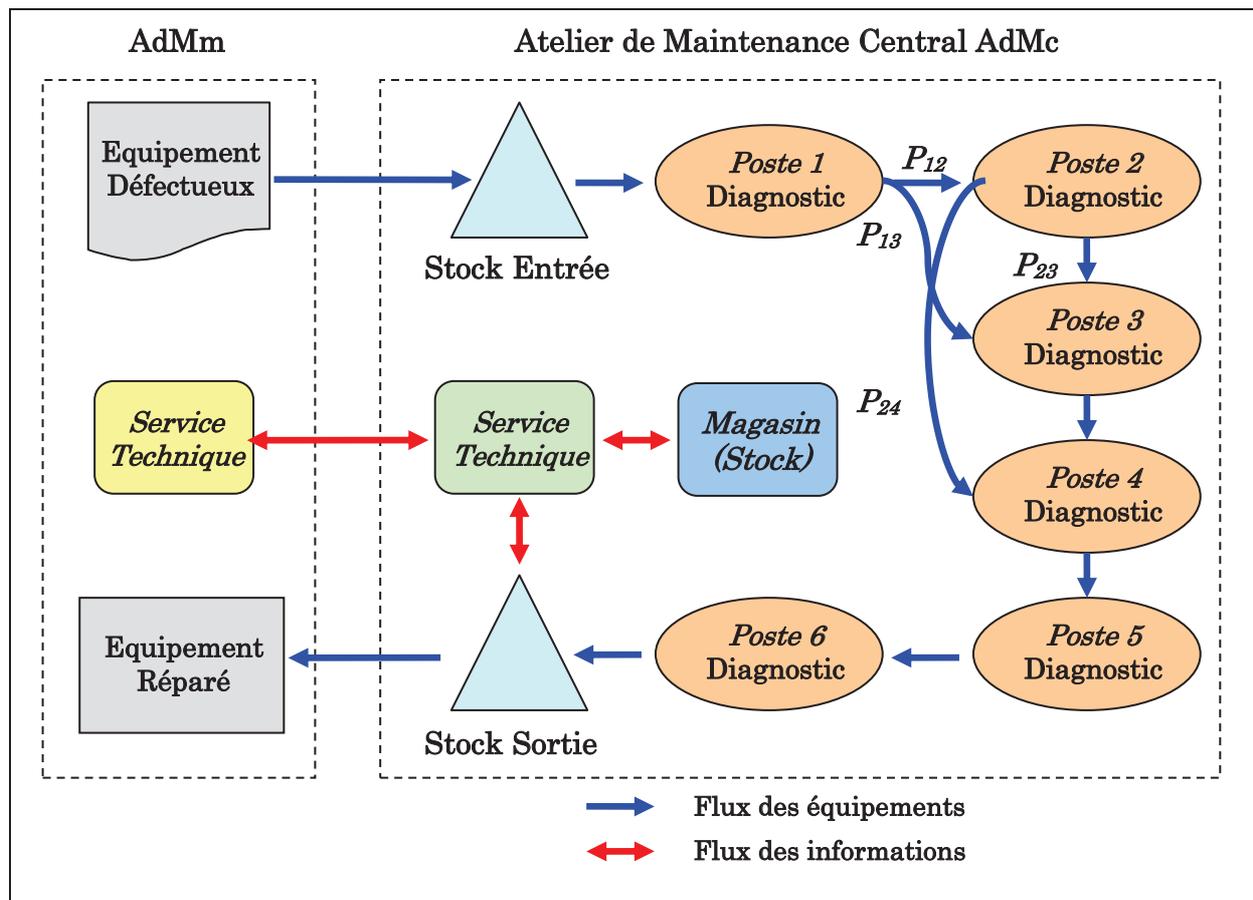


Figure 3.2 Cycle de réparation d'un équipement défectueux dans un AdMc

Pour un équipement défectueux, le processus de réparation doit suivre les étapes suivantes : l'équipement est transféré à l'AdMc grâce à l'AdMm, une analyse au poste 1 de diagnostic est effectuée. Le résultat permet d'orienter l'équipement vers le poste de réparation adéquat. Une fois la réparation terminée, une phase de test est nécessaire pour valider l'intervention.

En entrée de l'atelier de maintenance centrale nous avons un stock d'équipements défectueux. En sortie, un stock d'équipements réparés. Ces deux zones de

stockage doivent être bien dimensionnées. L'objectif visé est de minimiser le temps de séjour d'un équipement dans l'atelier de maintenance central.

3.1.4 Conception d'un atelier de maintenance : dans le contexte distribuée

Les techniques et méthodes de maintenance dépendent du type de processus industriel à maintenir et de la nature du système, du sous système ou encore de l'équipement en mettant en œuvre des méthodes spécifiques tenant compte des technologies déployées selon les cas :

- systèmes mécaniques dynamiques : moteurs, pompes, ...,
- systèmes numériques programmés, ...,
- systèmes hydrauliques ou thermo hydrauliques, ...,
- systèmes électriques ou électroniques : capteurs, automates programmables ...,

Chacun de ces systèmes assure une ou plusieurs fonction(s) (pour diverses fonctions) selon ses composantes ou équipements.

En générale, dans la démarche de conception des ateliers de maintenance centrale et mobile, nous distinguons trois phases principales, à savoir *l'analyse du Système de production, l'identification des ressources matérielles et humaines de l'AdM et l'élaboration du plan de maintenance.*

3.1.4.1 Phase A : Analyse du SdP

Cette phase correspond à l'étude de l'ensemble des équipements des divers sites de production, en identifiant les pièces à analyser. Ensuite, les défaillances fonctionnelles détectées sont analysées des causes possibles et de ses effets sur les fonctions du site de production.

Pour le classement des équipements dans les différents sites de production par ordre de priorité, il existe deux méthodes :

- Classement avec la méthode Maintenance Basée sur la Fiabilité (MBF) :

Cette méthode est appliquée dans les entreprises et destinée à effectuer un programme de maintenance préventive permettant d'atteindre un niveau de fiabilité et de sécurité nécessaires des équipements et structures d'installation industrielle.

Ces objectifs portent notamment sur la concentration des efforts de maintenance sur les machines dont la défaillance altère le fonctionnement de l'entreprise et l'optimisation de la durée d'utilisation.

Cette méthode s'appuie sur une démarche de type AMDEC¹ (Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité). Ses objectifs s'articulent autour des points ci-après :

- Focaliser les efforts de maintenance sur les équipements dont la défaillance altère le fonctionnement de l'entreprise ;
 - Disposer d'une méthode d'élaboration de tâches de maintenance rigoureuse et documentée,
 - Optimiser la durée d'utilisation des équipements
 - Obtenir les informations nécessaires pour améliorer la conception des éléments dont la fiabilité s'avère inadéquate ;
 - Avoir des informations permettant l'établissement d'un programme de maintenance évolutif ;
 - Atteindre ces objectifs pour un coût minimal, incluant les coûts directs relatifs à la maintenance ainsi que ceux induits par les défaillances résiduelles.
- Classement avec la méthode d'agrégation multicritère :

Qui consiste dans le cas d'un problème multicritère à trouver la solution idoine à travers le listing des actions potentielles et des critères à prendre en considération, l'élaboration d'un tableau des performances en construisant des relations binaires entre les actions et les critères et enfin l'agrégation des performances en établissant des modèles de préférence globale pour résoudre le problème.

Il existe plusieurs méthodes mais dans notre problématique, on optera pour les approches multicritères de sur classement de synthèse, et là on retrouve :

- Méthode PROMETHEE pour le classement des machines :

Pour l'appliquer, il faut définir auparavant l'ensemble des actions à classer ainsi que les critères en précisant le poids et les fonctions d'évaluation qui leur sont associés.

¹ Qui en considération la probabilité d'occurrence de chaque mode de défaillance et la gravité des effets associés pour effectuer une classification suivant une matrice de criticité afin d'hierarchiser les systèmes selon leur priorité

En ce qui concerne l'analyse fonctionnelle des défaillances et de leurs causes, celle-ci consiste à étudier la fonctionnalité de chaque équipement que comporte la machine pour déterminer les types de défaillance et identifier les causes en question. Ainsi, il existe deux types d'analyses :

- a) une analyse fonctionnelle externe où chaque machine est considérée comme une boîte noire ;
- b) une analyse fonctionnelle interne qui associe à chaque fonction identifiée de l'équipement les modes de défaillance susceptibles de causer la perte ou la dégradation de la fonction.

3.1.4.2 Phase B : identification des ressources de l'AdM

Cette phase permet de déterminer qualitativement les ressources qui composent l'atelier de maintenance en termes de postes d'intervention, de techniciens et de pièces de rechange pour le remplacement et les compétences des techniciens et leurs qualifications.

Après avoir analysé les machines du système de production et les causes de leur défaillance, on peut ainsi :

- déterminer les machines à réparer, ensuite, les équipements à remplacer ;
- déterminer les différents postes d'intervention nécessaires ;
- connaître les compétences des techniciens et leur qualifications selon la nature de la défaillance ;
- déterminer le type de pièces de rechange à utiliser.

3.1.4.1 Phase C : Élaboration du plan de maintenance

Dans cette phase, on définit pour chaque équipement, le type d'action qu'il faut mettre en place. Ceci conduit à l'élaboration d'un planning initial des différentes tâches de maintenance. La périodicité des interventions est fixée en fonction du nombre de techniciens et des outillages et les postes associés. Un retour d'expérience au niveau de l'analyse des défaillances fonctionnelles permet d'améliorer le programme de maintenance au cours du temps à travers la suppression ou le rajout de tâches, l'externalisation de certaines tâches,....

Donc, le plan de maintenance initial évolue vers un plan dynamique enrichi par l'expérience de maintes façons :

- Par suppression ou rajout de tâches de maintenance ;
- Par espacement ou raccourcissement des périodicités des interventions ;

- par optimisation des coûts de maintenance, en réalisant un compromis entre les disponibilités des machines attendues et le coût d'investissement dans l'AdM.

3.1.5 Amélioration de la disponibilité des sites de production

En ce qui concerne, l'amélioration de la disponibilité des sites de production, la technique consiste à remplacer, selon la disponibilité dans le stock de l'AdM, l'équipement défectueux par un autre équipement réparé ou neuf, en entamant parallèlement la réparation.

La technique utilisée pour l'amélioration de la disponibilité des sites de production est alors la technique de réparation par remplacement. Cette technique, schématisée par l'organigramme de la Figure 3.3, consiste à remplacer, selon la disponibilité dans le stock de l'AdMm. Les pièces de rechange doivent être approvisionnés et mis dans le stock de sortie de l'AdMc afin de répondre rapidement aux besoins des SdP.

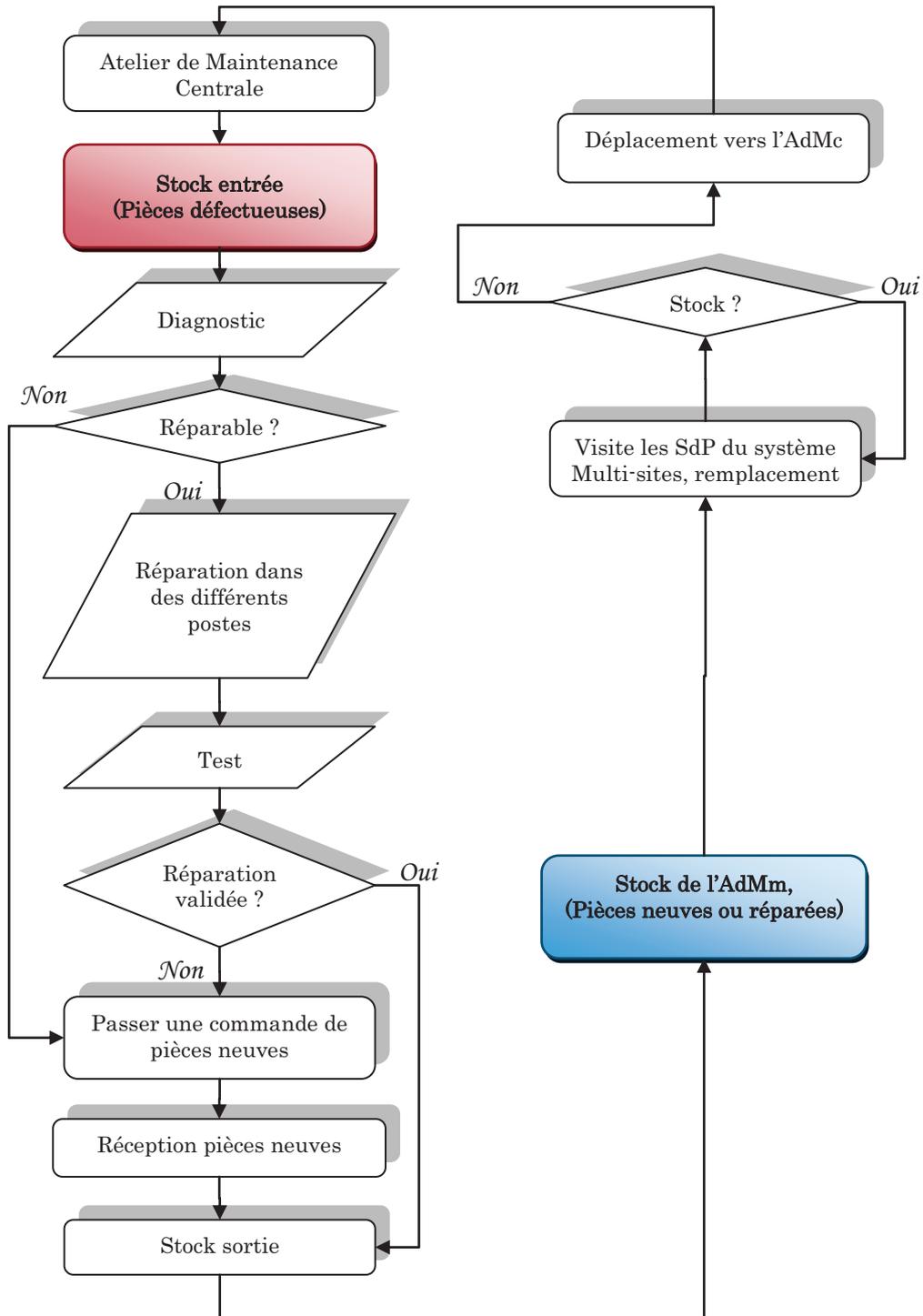


Figure 3.3 Technique de réparation par remplacement dans le contexte distribué

3.2 Modélisation modulaire

Les Réseaux de Petri (RdP) est un outil a fort pouvoir descriptif capable de représenter et d'analyser le comportement de systèmes complexes, y compris les phénomènes de synchronisation, parallélisme, concurrence ou encore le partage des ressources. Cet outil se prête bien à la modélisation d'un réseau d'ateliers de maintenance synchronisables.

Cet outil permet de modéliser les différents sites ainsi que le routage de l'AdMm. La complexité du système que nous étudions nous emmène à choisir la modélisation modulaire défini dans la thèse de (DANIEL O., 1995[20]). La décomposition du système complet en différents module, 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 SdP_i ; $i=1, 2,3,\dots,n$ où, n = nombre de sites de production dans le système étudié.
2. Un modèle générique représentant l'Atelier de Maintenance Central (AdMc).
3. Un modèle générique du stock de l'Atelier de Maintenance Mobile (AdMm).
4. Un modèle représentant l'Atelier de Maintenance Mobile (AdMm) avec le routage associé.

Le tableau 3.2 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 intersites : $(d_{i,i+1})$ - Durée de remplacement : (τ_p)	- Planification des tâches. - Dimensionnement des ressources opérateurs et outillage. - Gérer le coût optimal.
SdP	- Références équipements - Distance de l'AdMc: $(d_{0,i})$	- Durée de remplacement. - Minimiser le temps d'attente.

Tableau 3.2. – Récapitulatif des données et objectifs pour chaque type d'atelier

3.2.1 Les Réseaux de Petri Stochastiques Généralisés à la Synchronisation Interne (RdPSGSyI)

En 1978, les réseaux de Petri stochastiques (RdPS) ont été introduits par (NAKTIN S., 1980[48]) et (MOLLOY M.K., 1981[46]). 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 (Figure 3.4). 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 Synchronisé (**RdPSy**) (Moalla M. et al., 1978[45]). Dans cette thèse 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**). (SASSINE Ch., 1998[55]) et (DANIEL O., 1995[20]).

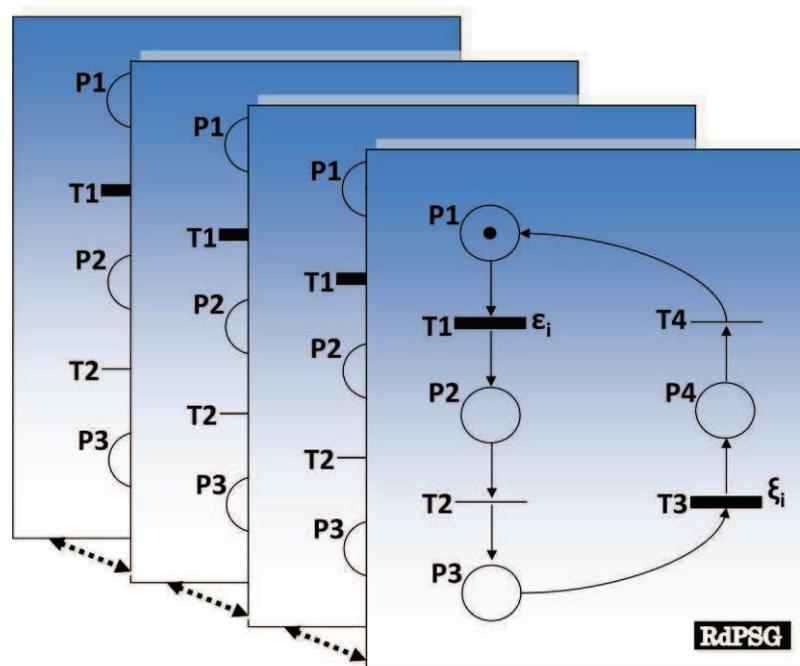


Figure 3.4 Réseaux de Petri Généralisés à Synchronisation.

3.2.2 Pourquoi (RdPSGSyI) ?

- RdPSGSyI, est un outil adéquat pour modéliser notre système car il est constitué à la fois de transitions immédiates, pour les événements sans retard et des transitions stochastiques, comme la panne et les événements retardés. Ces transitions peuvent aussi être synchronisées par des événements internes et/ou externes

- la modélisation par RdPSGSyI, présente différents avantages comme :
- ❶ Description modulaire : profitant de la synchronisation, chaque module (atelier de maintenance, site de production, ...) peut être représenté par un modèle générique.
 - ❷ Clair et très lisible : cet avantage nous permet de surveiller les divers états du système et ensuite, proposer les solutions pour résoudre les problèmes s'ils existent.
 - ❸ Analyse simple : grâce à la bonne lisibilité et la simulation du modèle qui permet d'évaluer les performances.

Avec tous ces avantages, nous pouvons décrire RdPSGSyI comme un outil de modalisation **Très puissant**, et pour notre cas d'étude bien **adéquat**.

3.2.3 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)*. 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.

**/Remarque:*

Lorsqu'un marquage valide à la fois des transitions immédiates et de transitions temporisées, la priorité est donné aux franchissements des transitions immédiates.

□

3.2.4 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 :

- 1- Faire une division structurelle du système. On obtient à la fin de cette phase des sous-systèmes, comme, les n sites de production ou bien l'Atelier de maintenance mobile.
- 2- Faire une division fonctionnelle de chaque sous-système obtenu : l'Atelier de Maintenance Mobile peut être décomposé à deux sous-cellules (Routage et Stock).
- 3- Un modèle générique est associé à chaque sous-cellule en utilisant RdPSGSyI,
- 4- À chaque sous-cellule, des signaux de synchronisation sont générés : les places lorsqu'elles sont actives envoient des signaux ($?Sy$) qui conditionnent les transitions qui les reçoivent ($!Sy$).

3.3 Modèles génériques

3.3.1 Structure des modèles

Le système multi-sites est constitué des différents modèles génériques basés sur les (Réseaux de Petri Stochastiques généralisés à Synchronisation Interne) RdPSGSyI (Figure 3.5).

Nous proposition d'une modélisation modulaire par les sous-cellules représentant :

- Les zones de stockage : c'est le même modèle qui représente l'évolution du stock aussi bien pour l'atelier mobile et l'atelier central que pour les sites de production.
- Les sites production SdP_i : c'est le 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 le 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 le modèle qui doit tenir compte de la capacité de stockage de l'AdMm.
- Les politiques de maintenance : c'est le modèle qui doit tenir compte des tâches de maintenance correctives / préventives.
- Le routage : c'est un modèle qui représente la planification des tâches de maintenance de l'AdMm suivant une planification prédéfinie.

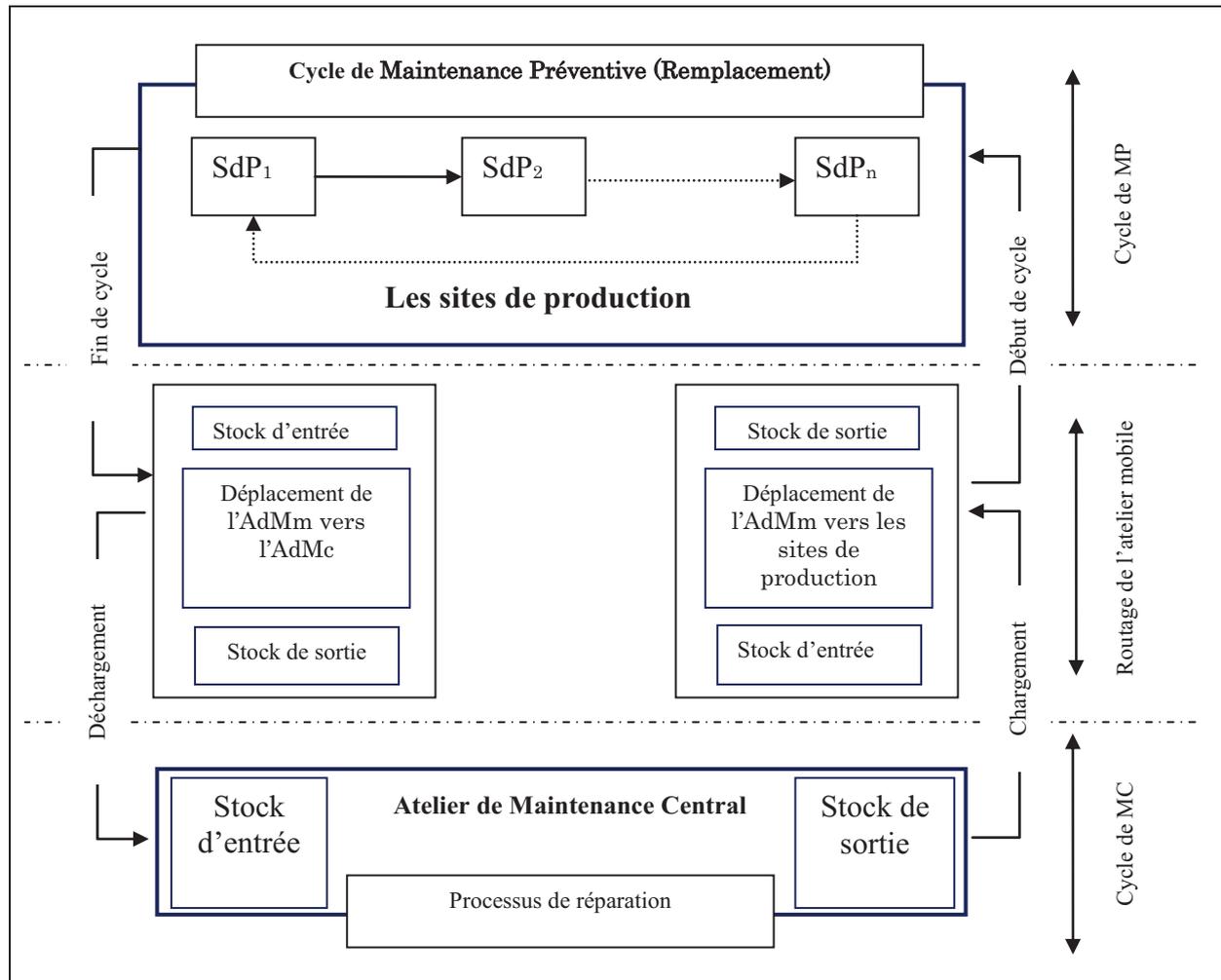


Figure 3.5 La Modélisation modulaire dans le contexte distribué

3.3.2 Modèle générique du Stock

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 processus de maintenance.

Le modèle RdPSGSyI du stock des pièces de rechange dans l'Atelier de Maintenance Mobile (AdMm) est schématisé ci-dessous dans la Figure 3.6, avec trois places et trois transitions.

Cet Atelier est caractérisé par une capacité de stockage notée (η_j) qui correspond au nombre maximum de pièces de rechange pouvant être stockées, est représentée dans la place P1.

Pour pouvoir réaliser une activité de maintenance, on doit disposer, au moins, d'une pièce dans ce stock (c'est-à-dire qu'il y a une ressource de pièces de rechange à fournir). La place P1 représente donc le nombre de marques ou jetons indiquant le nombre de pièces à rechange disponible dans le stock. Ce nombre est initialisé à la

Modèles génériques

capacité maximum (η_j). Donc, une condition pour qu'une activité de maintenance soit lancée est d'avoir d'une ou de plusieurs pièces de rechange disponibles dans le stock, ce qui est traduit sur le modèle par une ou plusieurs marques dans la place P1. La place P1 envoie un signal ($!pds$) qui indique qu'il y a au moins une pièce disponible dans le stock.

Lorsqu'une activité de maintenance est effectuée, une pièce sort du stock, le nombre de marques dans P1 est décrémenté ($\eta_j - 1$).

La transition T1 est conditionnée par le début d'opération de Maintenance Corrective ou Préventive. Autorisant ainsi, l'envoi d'un signal confirmant le bon déroulement du retrait de la pièce et indiquant une place libre dans le stock (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). Ce signal annonce qu'il y a au moins une place libre pour recevoir une pièce défectueuse à la fin ou en cours de la maintenance. Pour être sûr que l'état du Stock ne soit pas modifié pendant la maintenance, on prend en compte l'événement de la fin de la maintenance pour autoriser le déplacement de cette marque de la place P2 à la place P3 signifiant ainsi que la maintenance est effectuée et une pièce défectueuse se trouve dans le stock à la place de la pièce neuve.

Il est important de signaler ce qui suit :

**Remarque :*

L'Atelier de Maintenance Mobile (AdMm) ne fait pas de diagnostic ni pour savoir si la pièce remplacée est défectueuse ou encore en fonctionnement, ni si elle est réparable ou pas. Ainsi, cette pièce sera rendu dans le stock dans tous les cas de figure.

□

**Remarque :*

Le marquage de P1 représente le nombre de pièces en bon fonctionnement (n_b) le marquage de P3 représente le nombre de pièces défectueuses (n_d).

□

**Remarque :*

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

□

La marque qui arrive à la place P3 va autoriser l'envoi d'un signal indiquant l'augmentation du nombre de pièces défectueuses dans le Stock. Au cas où ce nombre atteint un seuil prédéfini (seuil de stock sécurité), deux signaux arrivent simultanément, signalant ainsi que le nombre des pièces disponibles dans le stock a atteint le niveau critique (stock nul) et que le nombre des pièces défectueuses dans le stock a atteint le niveau max (stock saturé). Cette situation impose un réapprovisionnement du stock de l'AdMm par des pièces neuves et/ou réparées au niveau de l'AdMc.

Cet événement va décharger le Stock des pièces défectueuses et le charger par sa capacité des pièces neuves/réparées. Et ainsi, il remettra le model à zéro, on retournera à l'état initial.

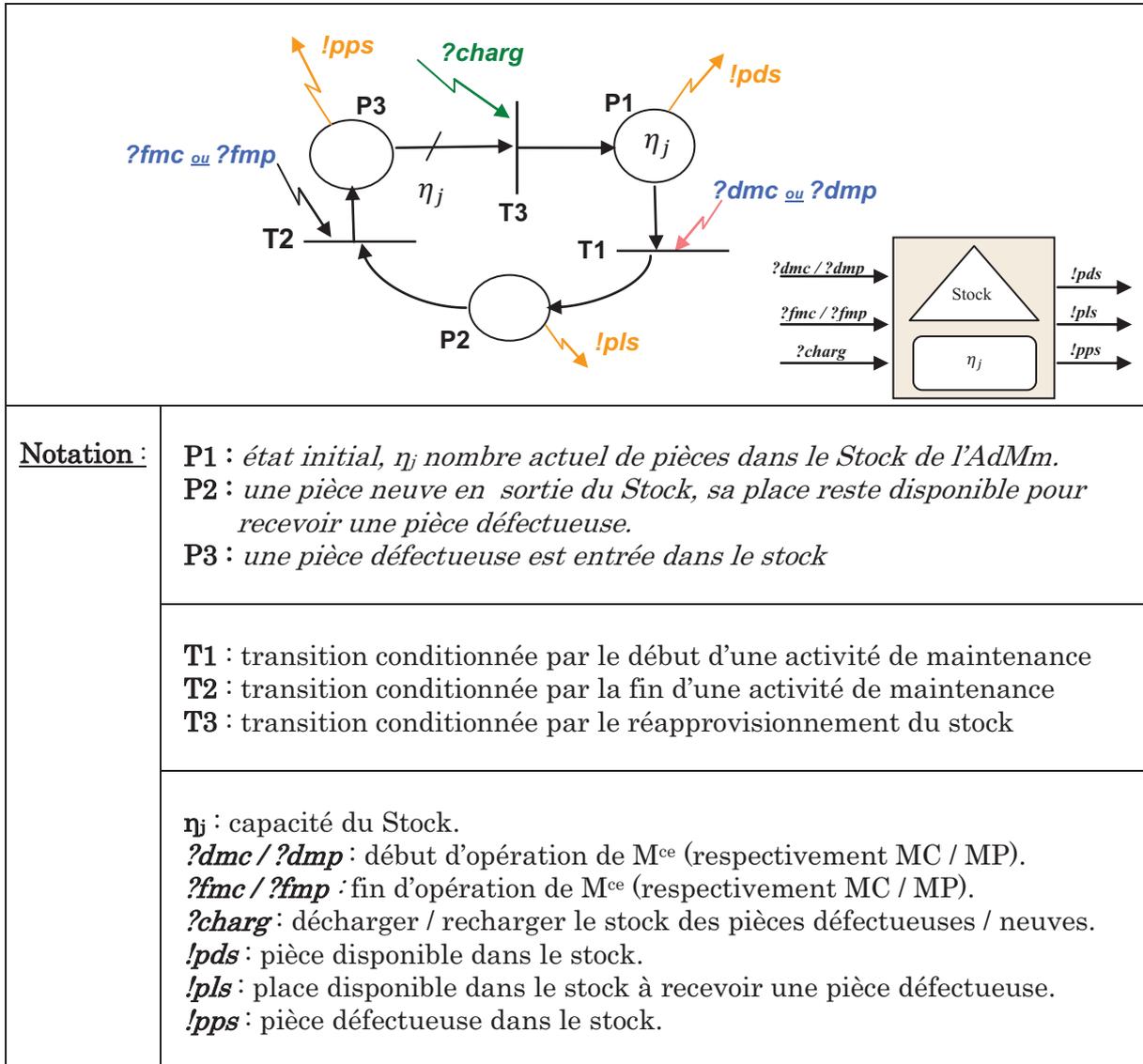


Figure 3.6 Module de Stock

Formellement, ce modèle générique s'écrit :

$$R_{MACH} = \langle P, T, [W], M_0, \Delta, !Sy, ?Sy \rangle$$

Avec:

$$P = \{P_1, P_2, P_3\}$$

$$T = \{T_1, T_2, T_3\}$$

Où :

$$[W] = \begin{matrix} & T_1 & T_2 & T_3 \\ \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{matrix} & \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Et :

$$M_0 = \{\eta_1, 0, 0\}$$

$$\Delta = \{0, 0, 0\}$$

$$!Sy = \{!pds, !pls, !pps\}$$

$$?Sy = \{?dmc/?dmp, ?fmc/?fmp, ?charg\}$$

3.3.3 Modèle générique des Sites de Production

Un site de production peut être modélisé par les quatre phases suivantes : repos, marche, panne et réparation. Les paramètres caractéristiques d'un site de production sont : le taux moyen de chargement / déchargement (ε_i), le taux moyen de service (ξ_i), le taux moyen de panne (λ_i) et le taux moyen de réparation (μ_i).

La Figure 3.7 représente le modèle d'un site de production représente le fonctionnement normal (production) : Le site peut être au repos en (P1). Le cycle d'usinage commence par le franchissement de la transition T1. Une fois la phase de chargement est coulée, le site est en marche en (P3) pendant toute la durée du service associé à la T3. Le site revient à l'état initial en attendant un nouvel ordre de fonctionnement.

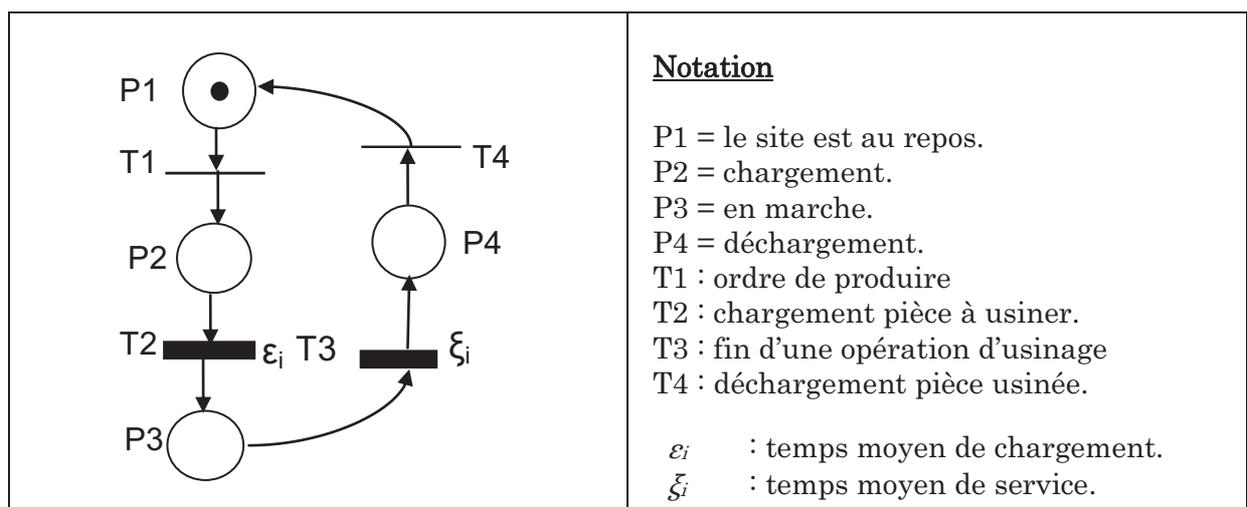


Figure 3.7 Model Site de Production-usinage

Pour prendre en compte les éventuelles défaillances des équipements du SdP, il est nécessaire de compléter ce modèle par les actions de maintenance corrective. Nous

représentons dans la Figure 3.8 le modèle de fonctionnement normal avec les actions nécessaires (maintenance corrective) les actions permettant la remise en état du site. Cela se traduit par :

- en P5, la prise en compte de la défaillance en franchissant la transition T5 avec un taux de panne (λ_i) ;
- en P6, un appel est lancé à l'Atelier de Maintenance Mobile. L'attente de l'arrivée de l'AdMm est représentée par un taux d'attente (ρ_2) associé à la transition T7 ;
- en P7, la phase de réparation est représentée par un taux de réparation (μ_{Ci}) associée à la transition T8 ; une fois la réparation terminée le système revient à l'état repos en P1.

**/Remarque :*

- Toute présence de pannes rend le site de production indisponible et ce, durant toute la phase de réparation.
- Une maintenance corrective (MC) ne peut être lancée qu'après l'occurrence d'une panne et la présence de l'Atelier de Maintenance mobile.

□

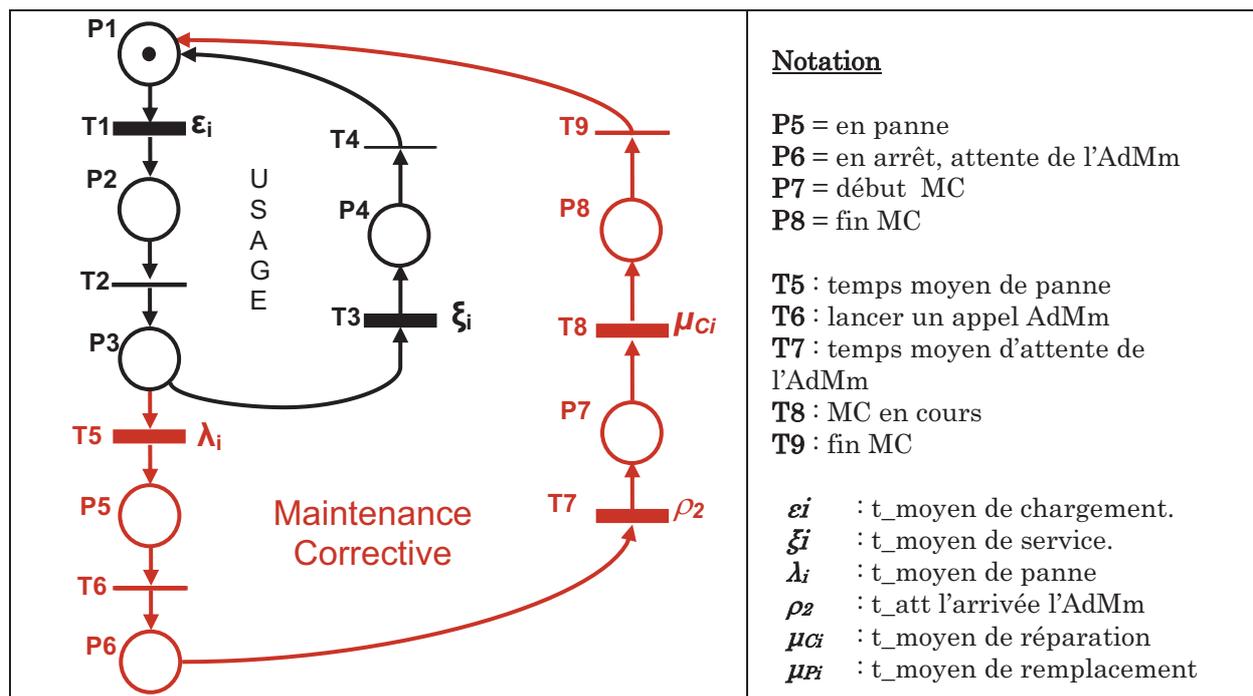


Figure 3.8 Model Site de Production – MC

Pour prendre en compte les occurrences de MP au niveau de chaque SdP, il est nécessaire de compléter le modèle par les actions de maintenance préventive. Ces actions ne sont déclenchées que si et seulement si, le site est au repos en (P1). Nous complétons le modèle (voir la Figure 3.9), par les actions nécessaires correspondant à la maintenance préventive. Cela se traduit par :

- à l'occurrence de la date de la maintenance préventive, correspondant au franchissement de la transition T10, le système est en attente de l'AdMm en P9 ;

- en P9, un appel est lancé à l'Atelier de Maintenance Mobile. L'attente de l'arrivée de l'AdMm est représentée par un taux d'attente (ρ_1) associé à la transition T11

- en P11, la phase de remplacement est représentée par un taux de remplacement (μ_{Pi}) associée à la transition T13 ; une fois le remplacement terminé, le système revient à l'état de repos en P1.

**/Remarque :*

Il est important de signaler ce qui suit :

- Dans notre application, on prend en compte le type de Maintenance Préventive Systématique où les interventions se font à dates fixes et prédéfinies.
- Cette étude considère que les dates de faire la MP sont bien planifiées avec les cas où les Sites de Production sont au repos.

□

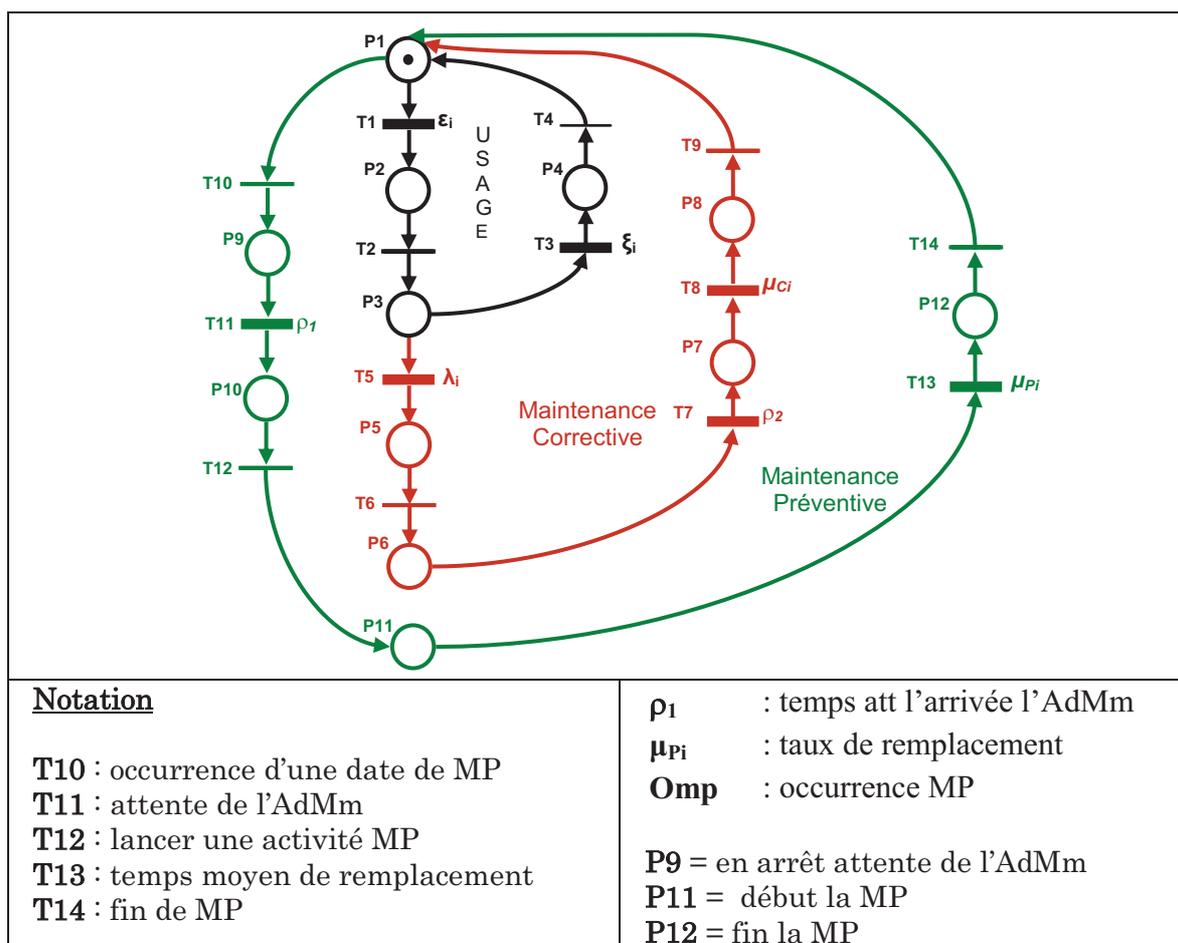


Figure 3.9 Model Site de Production-MP

Grâce à l'envoi et la réception des signaux de synchronisation, les sous-cellules représentant le modèle de chaque site de production sont synchronisées avec les autres sous-cellules composant le système global.

Les signaux utilisés annoncent les débuts et/ou les fins des tâches de maintenance, les occurrences de certaines dates, la présence de panne, et la présence de certaines ressources (AdMm, pièce de rechange, ...).

L'ensemble de ces signaux sont représentés par la Figure 3.10.

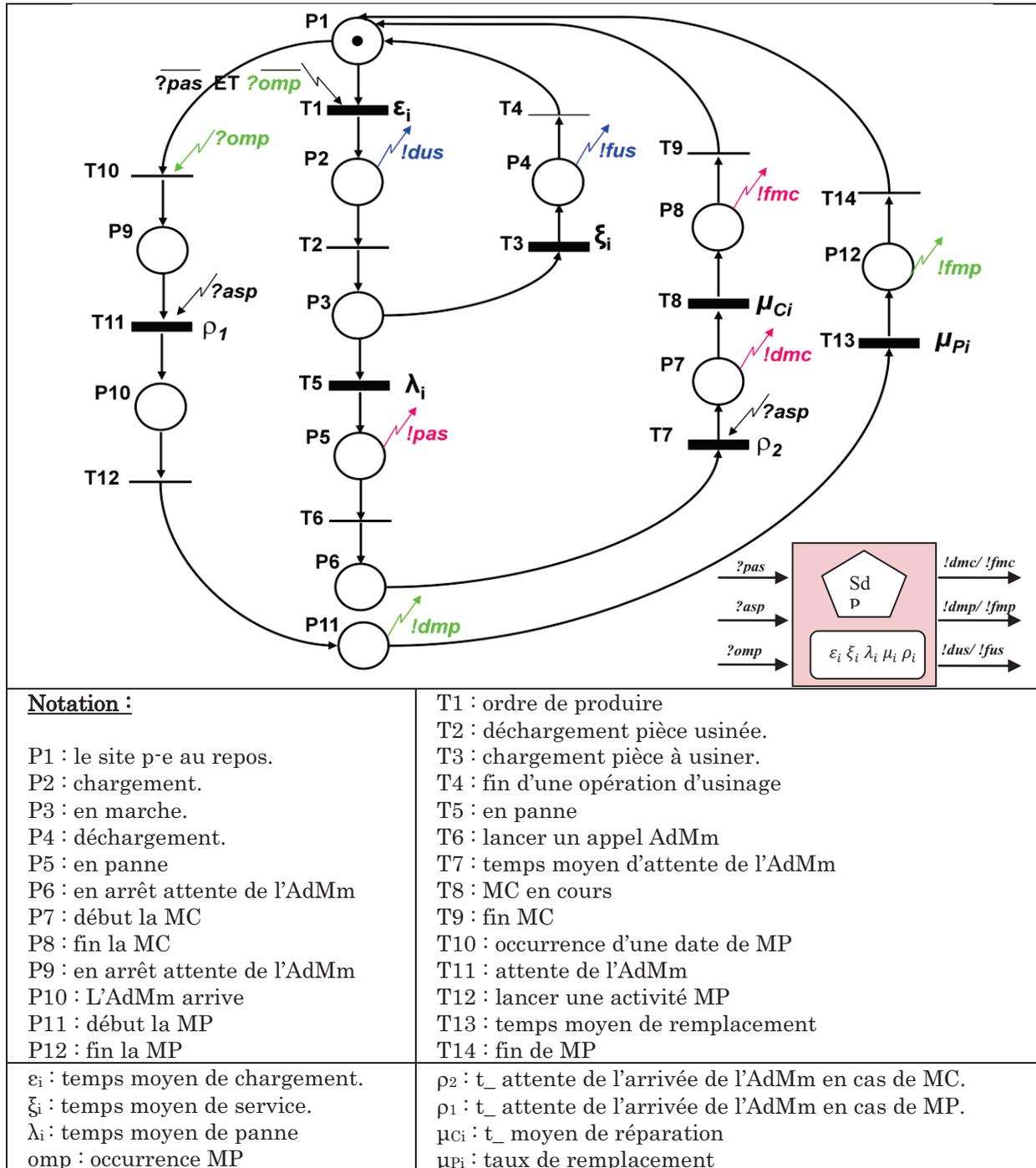


Figure 3.10 Model Site de Production-Synchronisation

Formellement, ce modèle générique s'écrit :

$$R_{MACH} = \langle P, T, [W], M_0, \Delta, !Sy, ?Sy \rangle$$

Avec:

$$P = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}, P_{11}, P_{12}\}$$

$$T = \{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8, T_9, T_{10}, T_{11}, T_{12}, T_{13}\}$$

Où :

$$M_0 = \{1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}$$

$$\Delta = \{\varepsilon_i, 0, \xi_i, 0, \lambda_i, 0, \rho_i, \mu_{ci}, 0, 0, \rho_1, 0, \mu_{pi}, 0\}$$

$$!Sy = \{0, !dus, 0, !fus, !pas, 0, !dmc, !fmc, 0, 0, !dmp, !fmp\}$$

$$?Sy = \{pas / ?omp, 0, 0, 0, 0, 0, ?asp, 0, 0, ?omp, ?asp, 0, 0, 0\}$$

$$[W] = \begin{matrix} & T_1 & T_2 & T_3 & T_4 & T_5 & T_6 & T_7 & T_8 & T_9 & T_{10} & T_{11} & T_{12} & T_{13} & T_{14} \\ \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \\ P_8 \\ P_9 \\ P_{10} \\ P_{11} \\ P_{12} \end{matrix} & \left[\begin{array}{cccccccccccccc} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \end{array} \right] \end{matrix}$$

3.3.4 Modèle des ateliers de maintenance : Central et Mobile

3.3.4.1 Modèle de l'atelier de maintenance : central

Un Atelier de Maintenance Central (AdMc) comporte l'ensemble de ressources (techniciens, postes d'intervention, outillage, pièces de rechange) destiné principalement à rétablir le fonctionnement d'un équipement venant des différents sites de production (maintenance corrective). Il est constitué de plusieurs postes nécessaires à la remise en état de l'équipement défaillant.

Sa mission est alors de prendre en charge les pièces défectueuses déchargées par l'AdMm, de remettre les pièces réparables dans un état de bon fonctionnement, le plus longtemps possible et avec des coûts d'intervention les plus faibles.

C'est l'Atelier de Maintenance Central (AdMc) qui doit garantir la mise à disposition des pièces de remplacement aux sites de production dans un délai minimale. Cette exigence nécessite un bon dimensionnement de la zone de stockage de l'AdMc.

Les pièces défectueuses venant de l'ensemble de sites de production grâce à l'AdMm entrent dans un cycle de réparation comme illustré par la Figure 3.11. Cette chaîne d'opération commence par une phase de diagnostic, qui permet d'orienter les équipements vers la réparation ou la mise en rebut.

Après la phase de diagnostic, les pièces réparables sont orientées selon, la nature de la panne, vers différents postes de réparation. Chaque poste de réparation a sa propre liste des procédures à suivre.

En sortant d'un poste ou une succession de postes de réparation, l'équipement passe à une phase de réglage et de vérification. Cette phase de réglage permet de mettre l'équipement dans la configuration d'utilisation optimale.

À la fin des processus de réparation, des tests de validation fonctionnelle sont effectués après l'assemblage de l'équipement. À la sortie du poste du test, l'équipement réparé est mis dans la zone du stockage prêt à être charger par l'AdMm.

Dès que l'AdMm arrive, il décharge son stock des pièces au niveau de l'AdMc, puis charge, en fonction de sa capacité de stockage, les pièces réparées ou neuves se trouvant dans le stock des pièces prêtes à être chargées.

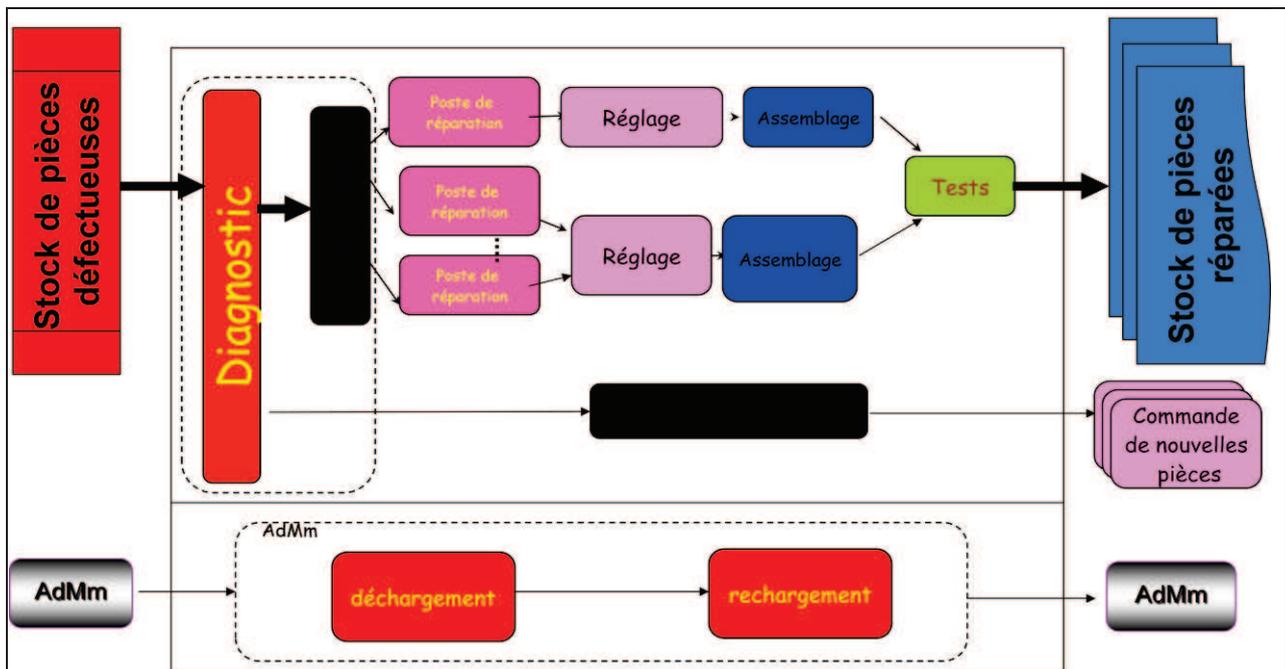


Figure 3.11 Modèle de l'Atelier de Maintenance Central AdMc

Le processus de déroulement d'une maintenance corrective de tout équipement peut être schématisé par la Figure 3.1 (ABBOU R., 2003[1]). Ainsi, On constate 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 à la préparation de la remise en état. L'intervalle $[t_0...t_7]$ correspond à la durée de l'indisponibilité de

l'équipement. Il dépend de plusieurs paramètres : des moyens mis en œuvre pour identifier les défaillances, du niveau des techniciens, des ressources, de l'infrastructure (GMAO Gestion de Maintenance Assisté par Ordinateur)... pour optimiser cet intervalle, des techniques de réparation par remplacement sont utilisés.

Afin d'améliorer la productivité, cette durée d'indisponibilité peut être minimisée par une gestion efficace des ressources de l'AdM et par une analyse des causes et des conséquences et par le retour d'expérience du programme de maintenance. Des travaux ont été réalisés permettant de proposer une structure d'AdM central garantissant une durée de séjour minimale de l'équipement défectueux (ABBOU R., 2004[2]). Ces travaux reposent sur l'utilisation des réseaux de files d'attente pour évaluer les performances de différentes configurations d'AdM (SIMEU-ABAZI Z., DI-MASCOLO M., 2007[58]).

3.3.4.2 Modélisation de l'atelier de maintenance : Mobile

3.3.4.2.1 Description de l'AdMm

C'est le modèle qui représente l'ordonnancement des actions de maintenance (correctives ou préventive) à effectuer par l'atelier mobile. Il est synchronisé par les dates d'occurrence des MP, l'occurrence d'une panne et le niveau de son stock.

Les paramètres pris en compte dans la phase d'évaluation sont :

- les distances intersites
- la capacité de stockage de l'AdMm

L'AdMm s'occupe de l'approvisionnement en pièces de rechange neuves (ou réparées) au niveau de l'AdMc mais aussi des différents déplacements vers les sites pour les opérations de remplacement.

L'ensemble des actions de l'AdMm se présente dans l'ordre suivant (Figure 3.12).

Nous considérons ici qu'il existe toujours un nombre de pièces réparées ou neuves au stock de sortie de l'AdMc (des pièces prêtes à être chargées), ce nombre de pièces est suffisant pour satisfaire le besoin de l'AdMm (sa capacité maximum).

Le temps du séjour de l'AdMm au niveau de site de production est calculé par le taux de remplacement d'une pièce défectueuse par une pièce neuve/réparée. Nous considérons que le taux de remplacement (τ_P) englobe respectivement le taux de déchargement d'une pièce neuve/réparée (τ_{de}) et le taux de chargement d'une pièce défectueuse (τ_c), ce qui se traduit par la formule suivante :

$$\tau_P = \tau_{de} + \tau_{ch} + \tau_{re}$$

Où : (τ_{re}) est le taux de remplacement effectif.

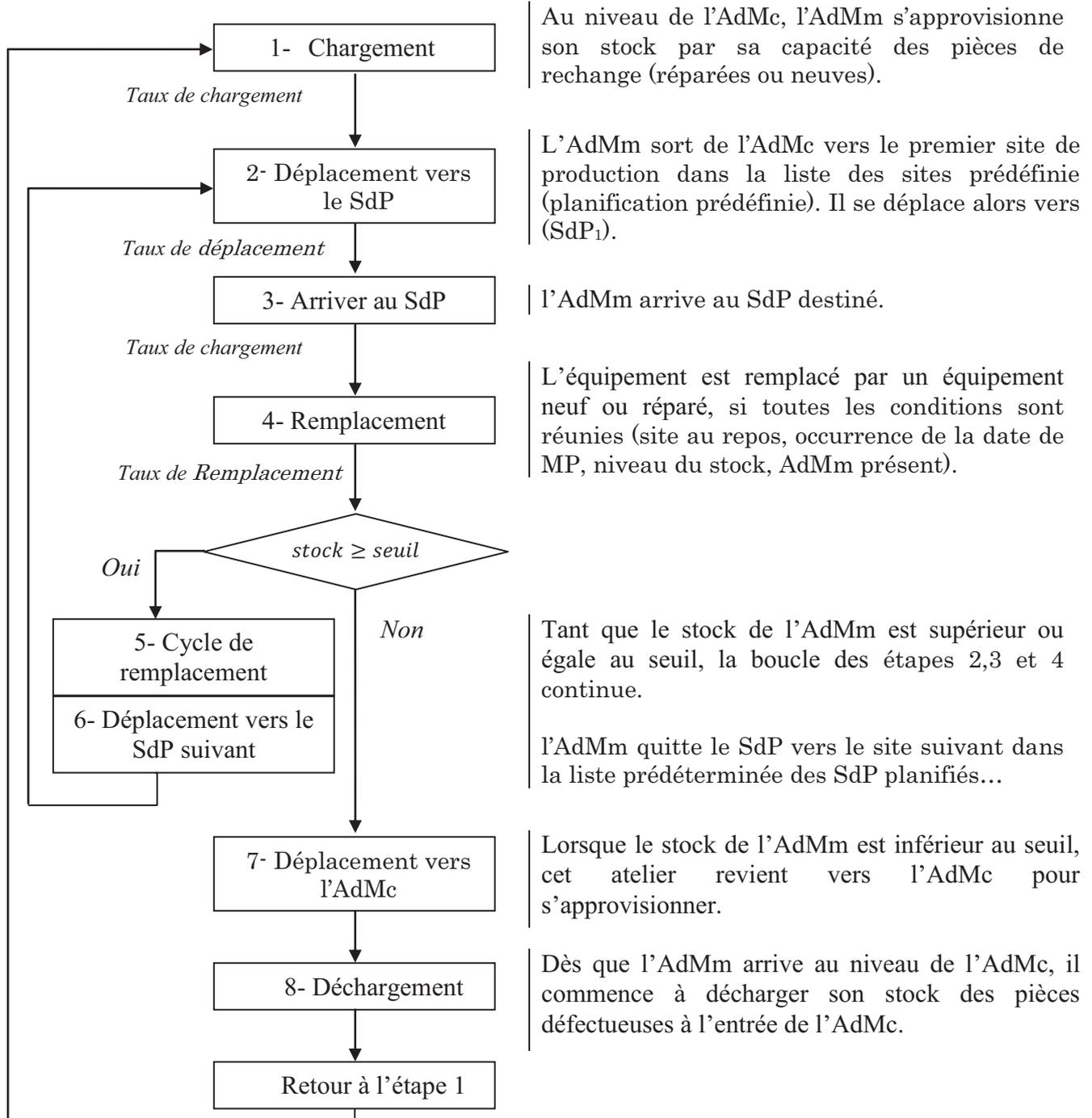


Figure 3.12 L'ensemble des actions de l'AdMm

Pour détailler la condition de retour à l'AdMc, il est utile de présenter un diagramme logique qui définit l'ensemble de ces activités (Figure 3.13).

À la fin d'une activité de maintenance, une vérification du niveau de stock de l'AdMm est effectuée. Si ce niveau est supérieur ou égale au seuil de sécurité (stock de sécurité), l'AdMm continue sa tournée, sinon, il revient vers l'AdMc pour

s'approvisionner. La condition de retour à l'AdMc n'est liée qu'au stock de l'AdMm (stock < seuil).

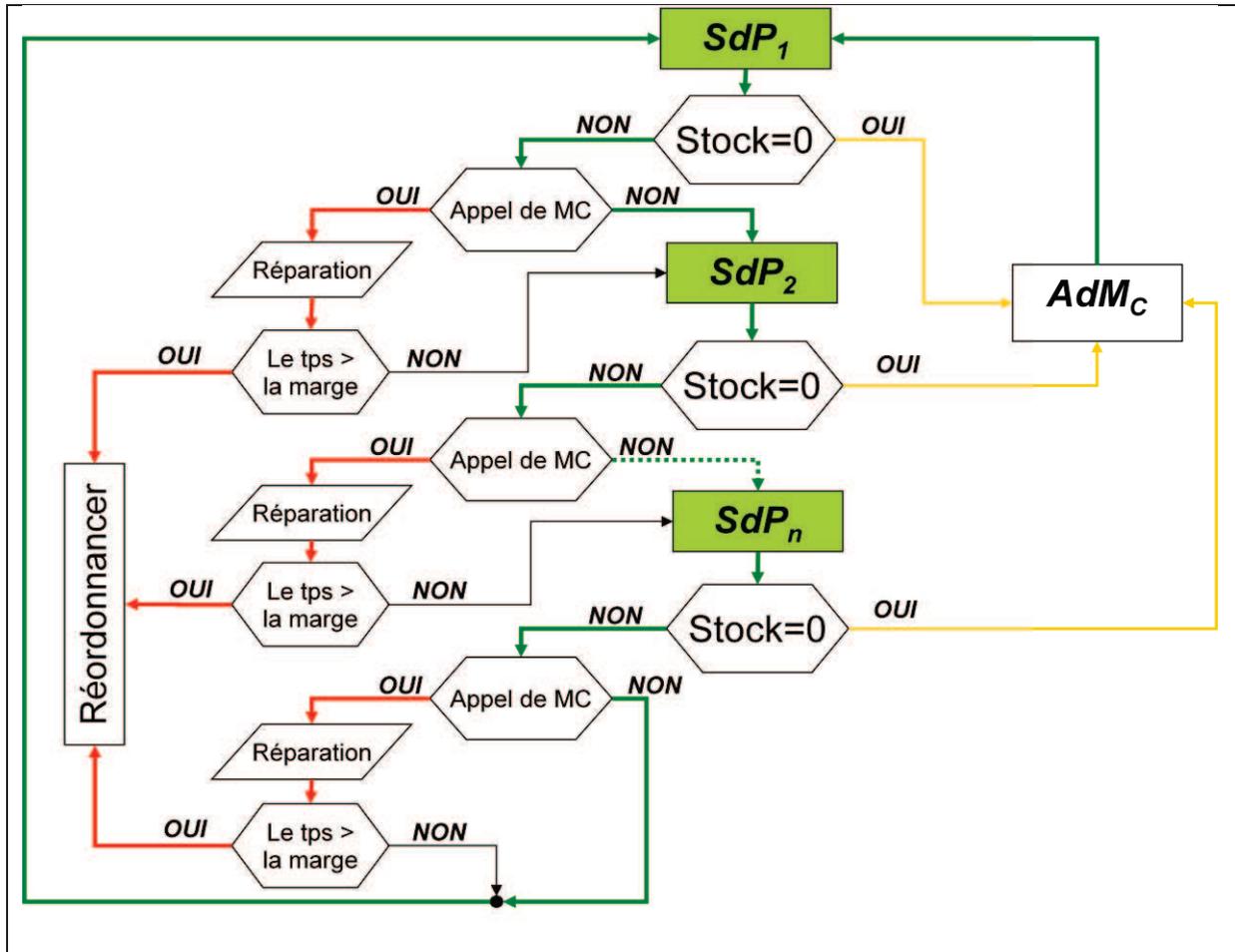


Figure 3.13 Organigramme du Routage de l'AdMm

3.3.4.2.2 Modèle de l'AdMm

Une activité de remplacement (Maintenance Préventive) est représentée par un modèle constitué de trois places P1, P2, et P3 et trois transitions T1, T2, et T3 comme le montre la Figure 3.14.

À l'occurrence de la date de faire la MP, T1 sera validé, une opération de remplacement commence (P2) envoyant un signal indiquant le début de MP ($!dmp$). Le temps moyen de remplacement est associé à la T2 (τ_p). En P3 un signal ($!fmp$) est envoyé indiquant que l'opération MP est finie, avec une mise à jour de la liste de SdP à visiter.

En P4, l'AdMm est en déplacement du SdP_i vers SdP_j. Un temps moyen de déplacement (τ_d) associé à la transition T4 varie suivant la distance entre le site actuel et le prochain site à visiter.

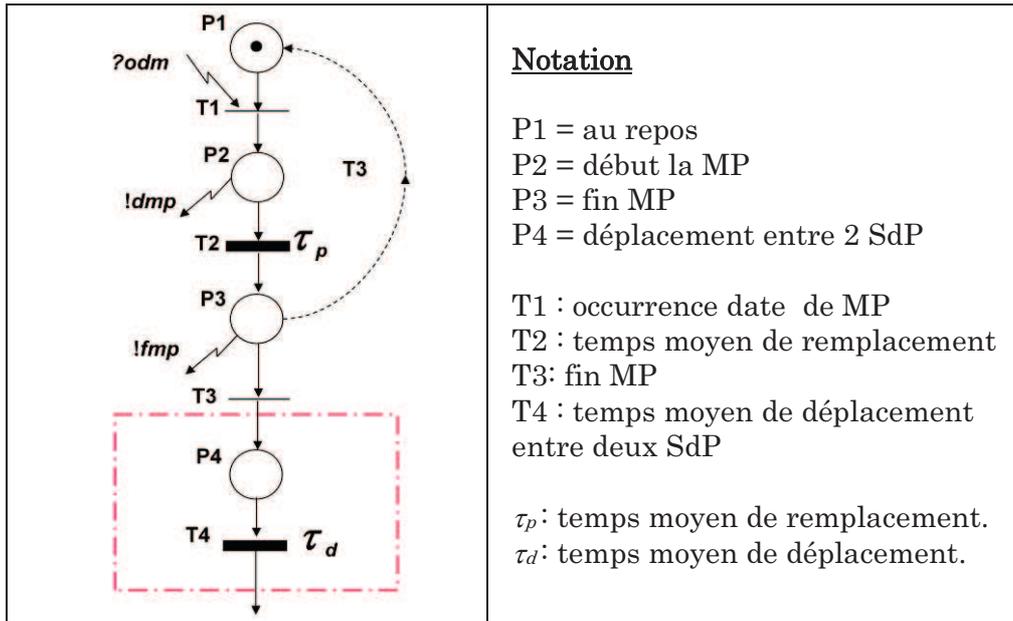


Figure 3.14 Module du routage de l'AdMm-1

Le modèle de la Figure 3.14 peut être reproduit pour n site de production. A titre d'exemple, la Figure 3.15 montre le modèle obtenu pour trois SdP.

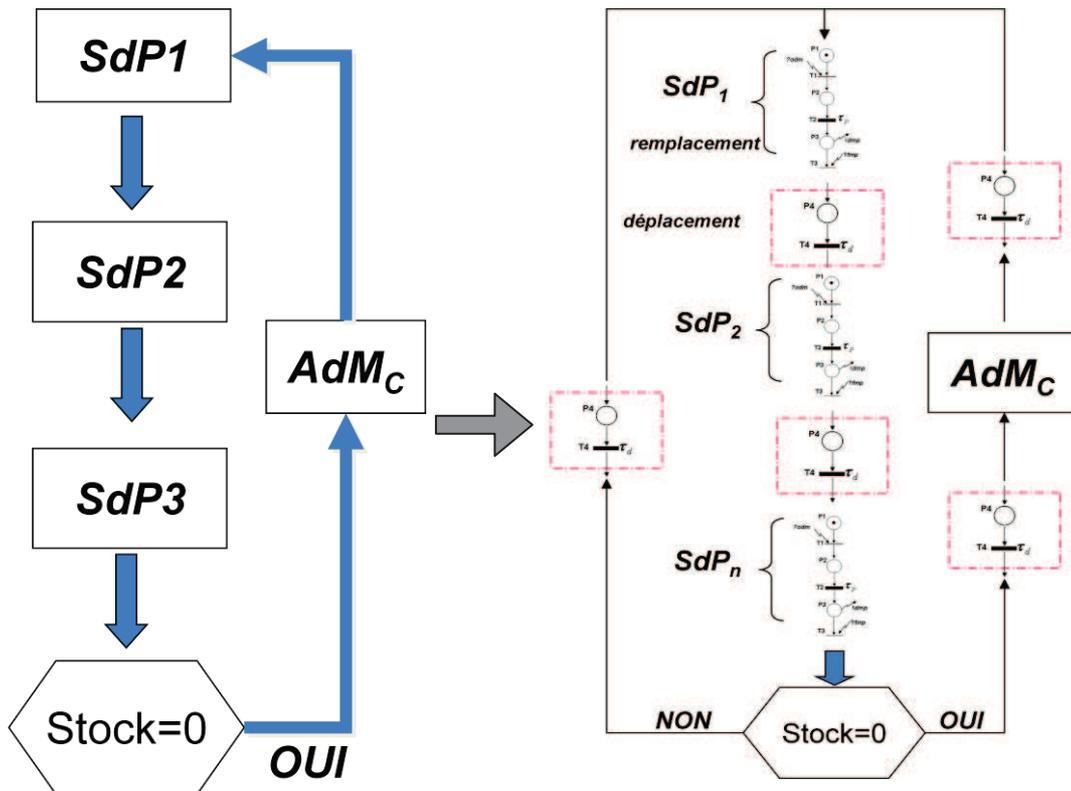


Figure 3.15 Module du routage de l'AdMm-2

La Figure 3.16 donne le modèle générique pour n SdP :

- En P0, l'AdMm s'approvisionne à partir de l'AdMc. Le déplacement vers le 1^{er} site de production de la liste de SdP à visiter, est représenté par le temps moyen de ce déplacement associé à la transition T6. Initialisation $i=1$.
- En P1, l'AdMm arrive au SdP,
- En P2, le remplacement commence.
- En P3, fin de l'opération de remplacement suivi de la vérification de l'état du stock.
- En P4, si le stock est nul, retour vers l'AdMc par P6, sinon, visite le prochain site par P5.

Le temps moyen de déplacement du dernier SdP (dans la liste des SdP à visiter) à l'AdMc est $(\tau_{0,n})$ associé à la transition T7.

Le temps moyen de déplacement d'un SdP $_i$ vers SdP $_{i+1}$ est $(\tau_{i,i+1})$ associé à la transition T4.

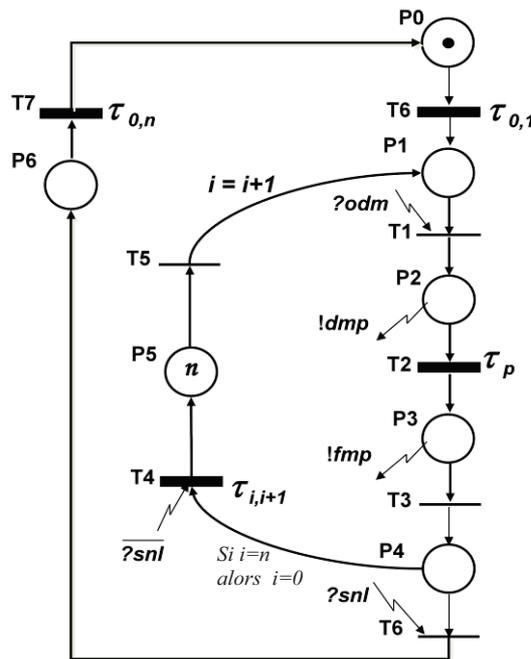


Figure 3.16 Module du routage de l'AdMm-3

En absence de panne, 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.

En l'absence de panne et tant que le niveau du stock est supérieur au seuil (stock de sécurité Ss), le routage s'effectue selon la planification prédéfinie.

L'occurrence d'une défaillance est susceptible de nécessiter un ré-ordonnancement des tâches, et ré-planifier la liste des SdP à visiter. La Figure 3.17 le représente ce cas de figure.

À la fin d'un remplacement, on détermine le prochain SdP à visiter en fonction de l'occurrence de deux événements qui orientent la décision à savoir, le niveau du stock et l'occurrence d'une défaillance. La présence d'un de ces événements entraîne une re-planification des tâches de MP. Dans le cas de l'occurrence d'une défaillance (signal ?pas) le prochain SdP à visiter est le SdP défaillant (P12).

L'AdMm est en déplacement vers le SdP en panne(P6'), le temps associé à T8 est le temps moyen d'atteindre le SdP défaillant. En arrivant à ce SdP, le signal (!dmc) est envoyé depuis P7 qui annonce le début de maintenance corrective. C'est une maintenance corrective parfaite (remplacement) dont le taux moyen est (τ_c) associé à T9.

Le signal (!fmc, fin de Maintenance Corrective) est envoyé depuis P8. En P9 on vérifie si la liste des SdP à visiter est toujours valable (T13 franchie). Si les conditions (état de stock et ordonnancement) sont toujours vérifiées, on passe en P11 pour continuer le cycle de visite. Sinon, un ré-ordonnancement est nécessaire avant de continuer le cycle.

Formellement, ce modèle générique s'écrit :

$$R_{MACH} = \langle P, T, [W], M_0, \Delta, !Sy, ?Sy \rangle$$

Avec:

$$P = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}, P_{11}, P_{12}\}$$

$$T = \{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8, T_9, T_{10}, T_{11}, T_{12}, T_{13}, T_{14}, T_{15}, T_{16}, T_{17}\}$$

Où :

$$M_0 = \{1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}$$

$$\Delta = \{0, \tau_p, 0, \tau_{i,i+1}, 0, \tau_{0,1}, \tau_{0,n}, \tau_{i,sp}, \tau_c, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0\}$$

$$!Sy = \{0, 0, !dmp, !fmp, 0, 0, 0, !dmc, !fmc, 0, !reord, 0, 0\}$$

$$?Sy = \{?odm, 0, 0, ?\overline{snl}, 0, 0, 0, 0, \overline{cond}, ?reord, ?cond, 0, 0, 0, 0\}$$

	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}	T_{11}	T_{12}	T_{13}	T_{14}	T_{15}	T_{16}	T_{17}
P_1	0	0	0	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0
P_2	-1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P_3	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P_4	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P_5	0	0	1	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	1
P_6	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P_7	0	0	0	0	0	1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P_8	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
P_9	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0
P_{10}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0
P_{11}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	-1	0	0	0
P_{12}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0

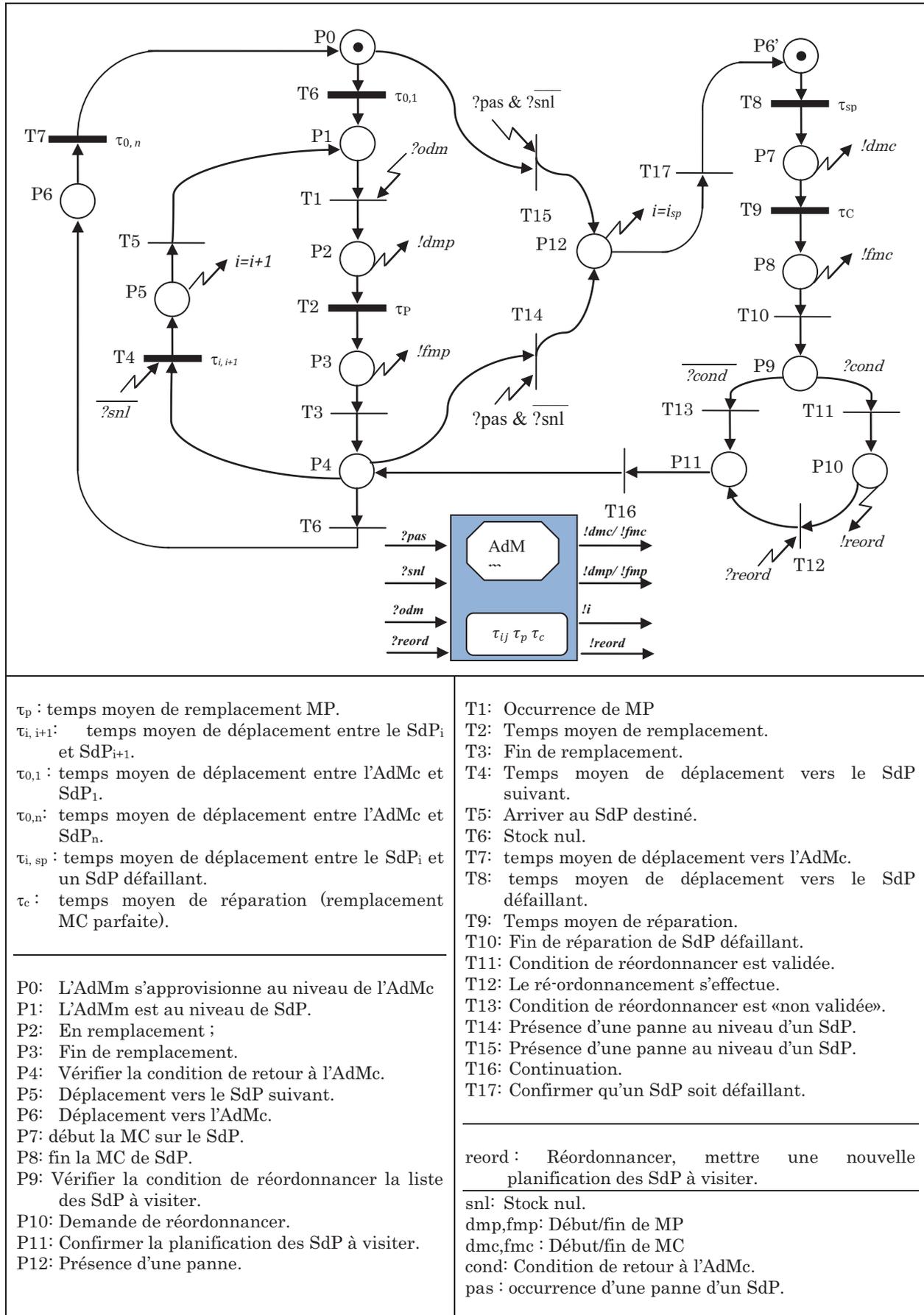


Figure 3.17 Module du routage de l'AdMm

3.3.5 Conclusion

Chaque modèle de **RdPSGSyI** peut être représenté par une boîte noire avec des entrées/sorties, des signaux de synchronisation et des paramètres caractéristiques à chaque sous-cellule associés au franchissement des transitions.

Une boîte noire se représente par un carré portant le nom du modèle. Des flèches entrantes spécifient l'ensemble des signaux reçus ($?S_y$) au niveau des transitions de ce modèle. Des flèches sortantes spécifient l'ensemble des signaux envoyés ($!S_y$) depuis les places de ce modèle.

Sur chaque boîte, on peut mentionner l'ensemble des taux moyens correspondants au modèle élémentaire.

De cette manière, nous pouvons représenter le système globale multi-sites par différents modèles boîtes noires synchronisés entre eux par l'envoi/réception des signaux. Ainsi, la Figure 3.18 représente le système multi-sites globale de manière générique.

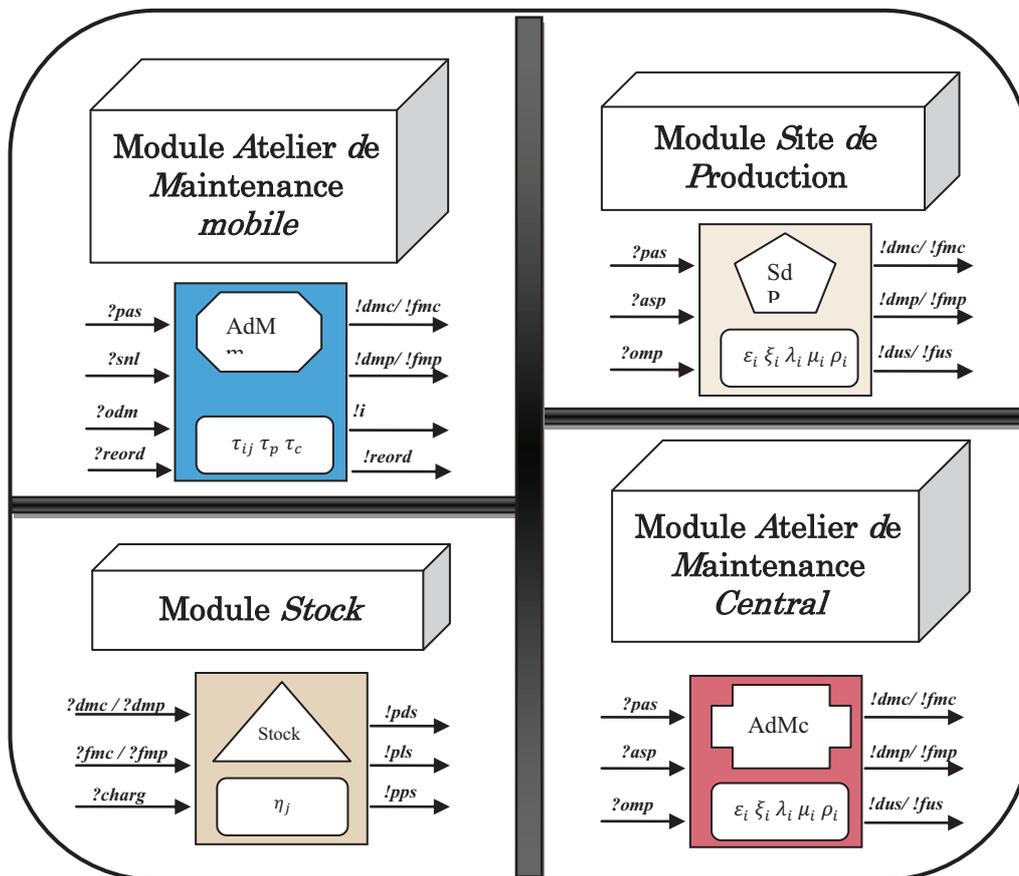


Figure 3.18 Modèle des boîtes noires des multi-sites

Ces différents modèles génériques, que ce soit sous forme de RdPSGSyI ou de boîtes noires, quel que soit la politique de maintenance (Corrective ou Préventive), nous permettent de générer des modèles de simulation afin d'évaluer les performances du système de la vue de la maintenance.

4 Chapitre IV

Méthodologie d'application de la Maintenance Distribuée ; Dimensionnement de l'AdMm

.....

Ce chapitre propose une méthodologie permettant de déterminer la fonction coût. Elle est basée sur les coûts associés au routage de l'atelier mobile (CR) et aux coûts de stockage des ressources (CS). Nous présentons dans ce chapitre l'algorithme de la « Fonction Routage » que nous avons défini. Cette fonction permet de générer les scénarios de parcours de l'Atelier de Maintenance Mobile AdMm. Elle dépend non seulement des données liées à la situation géographique des différents sites de production mais aussi, des durées associées aux actions de maintenance dans chaque site. Dans notre cas d'application, différentes hypothèses sont énoncées ainsi que les conditions d'application de l'algorithme. Ainsi, pour un nombre de site de production (n) et un budget donné, l'application de l'algorithme permet de définir la capacité de stockage ainsi que le routage optimal de l'atelier mobile. La méthodologie est illustrée sur des exemples d'application simples allant de 3 à 4 sites de production.

4.1 Principe général de la méthode

Dans le contexte de maintenance multi sites, les coûts de maintenance sont directement liés au positionnement de l'atelier central de maintenance par rapport aux différents sites de production. La généralisation de la méthode de calcul n'est pas évidente car plusieurs paramètres rentrent en jeu. Hormis les problématiques de routage et la capacité de l'atelier mobile on peut rajouter d'autres contraintes comme la disponibilité de l'atelier mobile, l'état du trafic routier, les problèmes de défaillance diverses qui rendent de plus en plus complexe le problème à solutionner. C'est pourquoi, sous certaines hypothèses, nous proposons une méthodologie qui repose sur les cinq étapes suivantes :

Étape 1 : *Acquisition des données ;*

- 1.1. *Acquisition des données géographiques*
- 1.2. *Acquisition des données temporelles*
- 1.3. *Composition des matrices de calcul*

Étape 2 : *Classification et traitement des données*

- a) *Traitement de données de distance*
- b) *Traitement de données temporelles*

Étape 3 : *Identification de la fonction coût*

Étape 4 : *Proposition d'une solution optimale « scénario optimal »*

4.2 Acquisition des données

4.2.1 Étape 1.1 - Acquisition des données géographiques

Les données géographiques concernent, comme leur nom l'indique, la situation géographique des différents Sites de Production (SdP) ainsi que la position de l'Atelier Central de Maintenance (AdMc). On notera les données de la façon suivante :

- Nombre de Sites de Production : n
- Les distances entre l'AdMc et les SdP $_i$: d_{ci} , ($i = 1, \dots, n$)
- les distances intersites de production : d_{ij} , ($i = 1, \dots, n$), ($j = 1, \dots, n$)

L'acquisition de ces données permet de construire la matrice primaire des distances : MD_p . C'est une matrice de dimension $(n + 1)^2$. Afin de faciliter l'écriture de cette matrice, nous avons appliqué l'hypothèse 1, la suivante :

Hypothèse 1 : Quelle que soit la position géographique de deux sites de production i et j données, on considère que la distance entre le site de production i (SdP_i) et le site de production j (SdP_j) est la même que la distance entre le site de production j (SdP_j) et le site de production i (SdP_i). Ce qui se traduit par :

$$\forall SdP_i, SdP_j \text{ alors } \begin{cases} Si i \neq j \text{ alors } d_{ij} = d_{ji} \\ Si i = j \text{ alors } d_{ij} = 0 \end{cases}$$

□

À partir de ces données et compte tenu de l'hypothèse 1, on obtient la matrice MD_P symétrique de dimension : $(n + 1)(n + 1) = (n + 1)^2$

$$MD_P = \begin{matrix} c \\ 1 \\ 2 \\ \dots \\ n \end{matrix} \begin{bmatrix} 0 & d_{c1} & d_{c2} & \dots & d_{cn} \\ d_{c1} & 0 & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{c2} & d_{12} & 0 & \dots & d_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{cn} & d_{1n} & d_{2n} & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

Dans l'étape de classification, cette matrice sera réorganisée suivant les critères d'éloignement par rapport à l'atelier central.

4.2.2 Étape 1.2 - Acquisition des données temporelles

Les données temporelles concernent, d'une part, les durées de bon fonctionnement de chaque site (dbf_i) et d'autre part la durée moyenne des interventions de maintenance. Nous supposons qu'une étude en amont sur la durée moyenne de bon fonctionnement de chaque site a été effectuée. Nous considérons comme donnée d'entrée, la périodicité de maintenance préventive pour chacun des sites et la durée des actions de maintenance préventives avec une marge de sécurité. On notera :

- dbf_i : la Durée moyenne de Bon Fonctionnement du site i ;
- dMP_i : la Durée de l'action de Maintenance Préventive sur le site i .
- δ_i : la marge de sécurité associée à l'action de maintenance préventive sur le site i .
- μ_c : temps moyen de séjour d'une pièce dans l'atelier central.
- α : le niveau de maintenance dans l'atelier central (1, 2 ou 3).

Nous définissons à partir de ces données, un vecteur de périodicité V_{MP} qui regroupe les durées de maintenance au niveau des sites de production ainsi que le temps moyen de séjour dans l'atelier central.

$$V_{MP} = \begin{matrix} c \\ 1 \\ 2 \\ \dots \\ n \end{matrix} \begin{bmatrix} \mu_c & \alpha & \delta_c \\ dbf_1 & dMP_1 & \delta_1 \\ dbf_2 & dMP_2 & \delta_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ dbf_n & dMP_n & \delta_n \end{bmatrix}$$

Ce vecteur est de dimension $3(n+1)$. Les conditions de validation seront détaillées dans l'étape de classification.

Hypothèse 2 : La politique de maintenance utilisée est une politique de remplacement. On considère donc que les durées d'intervention au niveau des différents sites sont égales. Ce qui se traduit par :

$$\forall SdP_i \neq SdP_j \text{ alors } \begin{cases} dMP_i = dMP_j \\ \delta_i = \delta_j \end{cases}$$

□

Cette politique se justifie par le choix de la politique de remplacement et par le fait que nous limitons l'application aux sites de production ayant les mêmes équipements.

4.3 Classification des données

La classification consiste à vérifier la validité des données ainsi que les conditions d'application. Concernant les données de distance, il s'agit de déterminer le plus court chemin. Les fondements de l'algorithme utilisé relèvent de la théorie des graphes : théorie du plus court chemin (Dijkstra, Belman Ford).

Afin de faciliter cette phase de classification, nous nous intéressons plus particulièrement à la distance entre l'AdMC et les sites SdP_i . Soit d_c l'ensemble des distances représenté dans (4.1).

$$d_c = [d_{c1}, d_{c2}, \dots, d_{ci}, \dots, d_{cn}] \quad (4.1)$$

Nous avons supposé que les sites sont représentés dans la matrice primitive MD_p des distances dans l'ordre croissant par rapport à l'atelier central, tel que :

$$d_{c1} \leq d_{c2} \leq \dots \leq d_{ci} \leq \dots \leq d_{cn} \quad (4.2)$$

4.3.1 Traitement des données de distances

Nous allons tout d'abord vérifier le calcul du plus court chemin sur le cas de deux sites i et j comme le montre la Figure 4.1 , pour ensuite le généraliser aux n sites de production.

On considère le triangle des distances (d_{ci}, d_{cj}, d_{ij}) de la Figure 4.1 avec $(j > i)$. Sachant que $(d_{ci} < d_{cj})$, la relation suivante doit être vérifiée :

$$d_{ij} \leq d_{ci} + d_{cj} \quad (4.3)$$

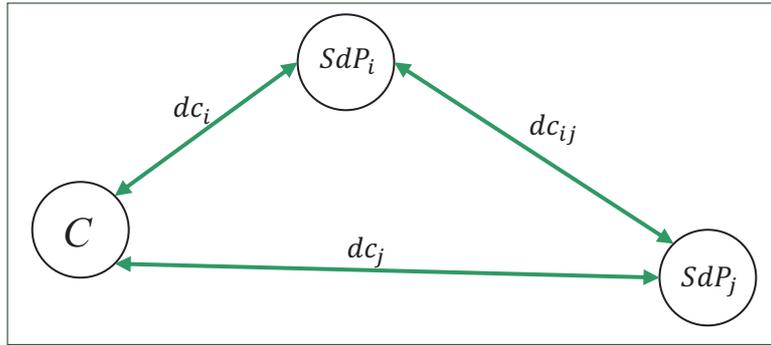


Figure 4.1 Les distances entre l'AdMc et les SdP

Cette condition vient du fait qu'un cycle correspond à la visite de tous les sites de production avant de revenir vers l'atelier central. Si la condition n'est pas vérifiée, le plus court chemin correspondra à un retour vers l'AdMc. La distance entre SdP_i et SdP_j doit être donc inférieure ou égale à la somme des distances qui mènent vers l'AdMc $(d_{ci} + d_{cj})$. On écrit alors:

$$\begin{aligned} SdP_i \rightarrow SdP_j : d_{ij} &\leq (d_{ci} + d_{cj}) \\ \text{ou bien; } d_{ij_{max}} &= d_{ci} + d_{cj} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Avec le même principe, on peut ajouter une autre condition extraite des relations triangulaires :

$$\begin{aligned} SdP_i \rightarrow SdP_j : d_{ij} &\geq (d_{ci} - d_{cj}) \\ \text{ou bien; } d_{ij_{min}} &= d_{cj} - d_{ci} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Les relations (4.4) et (4.5) donnent la condition générale suivante :

$$\begin{aligned} SdP_i \rightarrow SdP_j : \\ (d_{cj} - d_{ci}) &\leq d_{ij} \leq (d_{ci} + d_{cj}) \end{aligned} \quad (4.6)$$

L'hypothèse (4.2) avec la condition (4.6) nous permettent d'obtenir d'autres relations entre les distances intersites et les distances qui séparent les SdP à l'AdMc. Ce qui nous permet d'avoir les relations suivantes :

A partir de (4.4) on peut écrire :

$$\begin{aligned}d_{12} &\leq (d_{c1} + d_{c2}) \\d_{13} &\leq (d_{c1} + d_{c3}) \\d_{14} &\leq (d_{c1} + d_{c4})\end{aligned}$$

Et avec (4.2) on a :

$$\begin{aligned}d_{c1} &\leq d_{c2} \leq d_{c3}; \text{ alors } d_{12} \leq d_{13} \\d_{c1} &\leq d_{c2} \leq d_{c3} \leq d_{c4}; \text{ alors } d_{13} \leq d_{14}\end{aligned}$$

Donc,

$$d_{12} \leq d_{13} \leq d_{14} \quad (4.7)$$

La généralisation de (4.7) donne l'expression suivante :

$$\begin{aligned}d_{ij} &\leq d_{i(j+1)} \\ \text{ou bien : } d_{ij_{max}} &= d_{i(j+1)}\end{aligned} \quad (4.8)$$

On écrit alors :

$$\begin{aligned}d_{12} &\leq d_{13} \leq d_{14} \leq \dots \leq d_{1i} \leq \dots \leq d_{1n} \\ d_{23} &\leq d_{24} \leq \dots \leq d_{2i} \leq \dots \leq d_{2n} \\ d_{34} &\leq \dots \leq d_{3i} \leq \dots \leq d_{3n} \\ \dots & \quad \dots \quad \dots\end{aligned} \quad (4.9)$$

Nous utilisons le logiciel MATLAB pour l'acquisition des différentes données ainsi que la vérification des conditions d'application.

4.3.2 Traitement des données temporelles

L'objectif de ce traitement est de déterminer les dates au plus tôt et au plus tard d'une tâche de maintenance préventive dans un site de production. Il s'agit de savoir si une durée entre deux activités de maintenance préventive (*dbf*, Durée de Bon Fonctionnement) est possible et ses conditions d'application. On notera la date au plus tôt (*dbf_e*) et la date au plus tard (*dbf_l*).

La Figure 4.2 représente le parcours d'un AdMm où dMP représente la durée d'une maintenance préventive au niveau de chaque site de production.

Étape 3 : Identification de la fonction coût

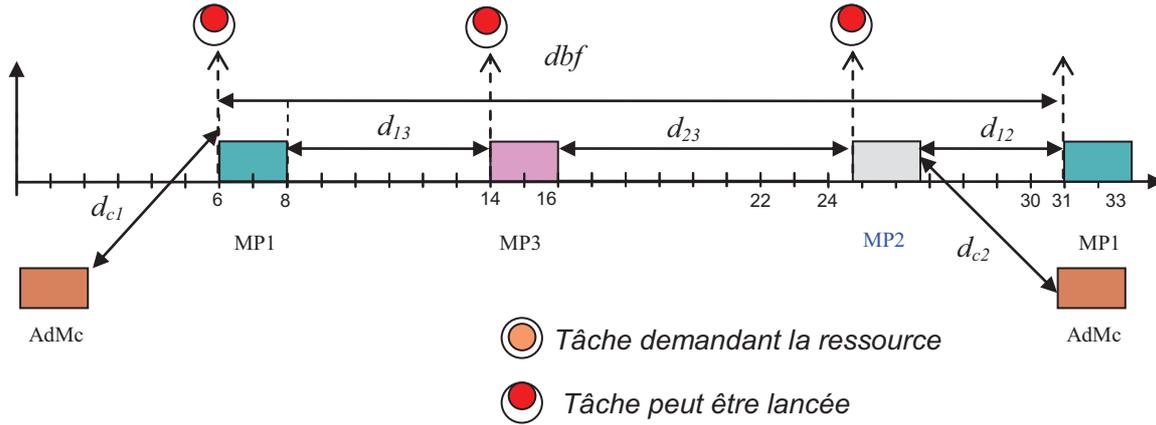


Figure 4.2 Diagramme Gantt, parcours de l'AdMm

De cette figure, on peut écrire :

$$dbf_e = dMP + d_{13} + dMP + d_{23} + dMP + d_{12} \quad (4.10)$$

Pour calculer dbf_i , on rajoute les deux distances à faire au début et fin de cycle. Pour n sites de production on obtient :

$$dbf_e = n * dMP + \sum_{i=1}^n (d_{i,i+1} + d_{n,1}) \quad (4.11)$$

$$dbf_i = dbf_e + d_{c1} + d_{cn}$$

Avec, (d_{ci}) et (d_{cn}) , sont respectivement, les distances de l'AdMc au 1^{er} SdP au début du cycle, et de retour du dernier SdP à l'AdMc en fin de cycle.

→ L'intervalle optimal de la durée d'un cycle est :

$$dbf_1 \in [dbf_e, dbf_1] \quad (4.12)$$

$$d_{c1} + d_{cn} = constant$$

4.4 Étape 3 : Identification de la fonction coût

On peut identifier le Coût de Routage (C_R) en fonction du nombre de cycles représenté l'équation d'une droite (4.13), présenté par la Figure 4.3 :

$$C_R = a . x + b \quad \text{où} \quad \begin{cases} a = \sum_{i=1}^n d_{i(i+1)} + d_{n1} \\ x = \text{nombre de tours} \\ b = d_{c1} + d_{cn} \end{cases} \quad (4.13)$$

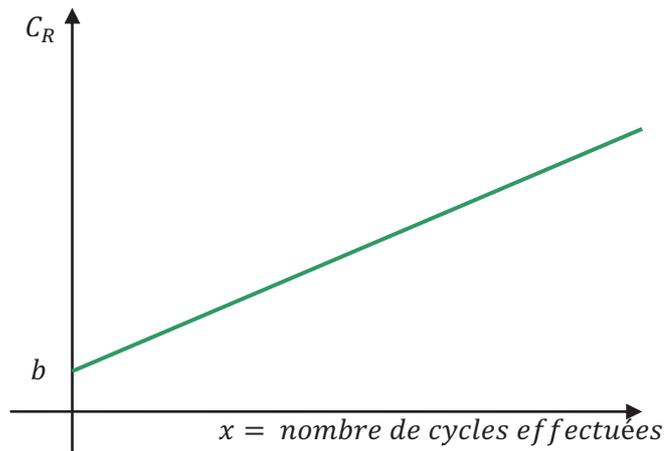


Figure 4.3 Coût de Routage
 d_{ij} = coût de déplacement de SdP_i vers SdP_j

4.5 Algorithme de calcul du Parcours économique

À partir de la Figure 3.12 et la Figure 3.13, on peut mettre l'algorithme suivant :

Fonction routage « Centralisation de maintenance pour n sites de production »

Initialisation ; « l'AdMm est au site de l'AdMc »

$n = \text{fini}$; « le nombre de sites de production est fini »

$i = 0$; « début du cycle de l'AdMm »

déjàvisité = 0 ; « paramètre nombre des SdP qui sont déjà visités, initial = 0 »

pasencorvisité = n ;

Répéter

Pour le temps de chargement

Attendre la fin de chargement des pièces neuves

l'AdMm s'approvisionne son stock pour un nouveau cycle

Fin pour

Tant que pasencorvisité \neq ensemble vide

Si ; $\eta \geq Ss$ « Ss : Stocke de sécurité »

Faire

***Déplacement** ; vers SdP_i*

Attendre l'horloge de temps de déplacement

correspond à la distance entre SdP_i et SdP_{i+1}

Fin déplacement, l'AdMm est arrivé au SdP_{i+1}

***Remplacement** ;*

Attendre l'horloge temps de remplacement

Fin de remplacement

déjàvisité = déjàvisité+1;

$i = i+1$

Si Panne ≠ vide

$i = \text{SdP défaillant} ;$

Déplacement ; vers SdP_i défaillant

Attendre l'horloge temps de déplacement

correspond à la distance au SdP_i défaillant

Fin déplacement, arrivé au SdP défaillant

Réparation

Attendre l'horloge temps de réparation (MC)

Fin de réparation

$i = \text{déjàvisité} ;$

Fin Si

Mettre à jour la planification

Si modification de planification

Alors

Considérer la nouvelle liste

Sinon

Confirmer la liste des SdP à visiter

Fin Si

Fin Faire

$i = i + 1 ;$

Actualiser le système

Sinon

$i = 0 ;$

Déplacement ; vers l'AdMc

Attendre l'horloge de taux de déplacement

correspond à la distance entre SdP actuel et l'Admc

Fin déplacement, l'AdMm est arrivé à l'AdMc

Fin Si

$i = \text{déjàvisité} + 1 ;$

Fin tant que

Jusqu'à fin

Fin Fonction

Cet algorithme prend en compte toutes les conditions de retour à l'AdMc et l'interruption de l'ordre des sites à visiter dans la planification donnée, c.à.d, Si il y a des **modifications** de planification, on met la liste -des SdP à visiter- à jour, on continue (visiter les SdP) suivant la nouvelle liste, sinon, on confirme la liste actuelle ...

4.6 Application ; Cas de deux sites de production

Le nombre des parcours possibles (N) est en fonction de n nombre de sites de production, est donné par l'équation 4.14.

$$N = n! \quad (4.14)$$

Alors, dans le cas de deux SdP : $N = 2! = 2$ parcours possibles.

Ces parcours possibles sont représentés par la Figure 4.4 :

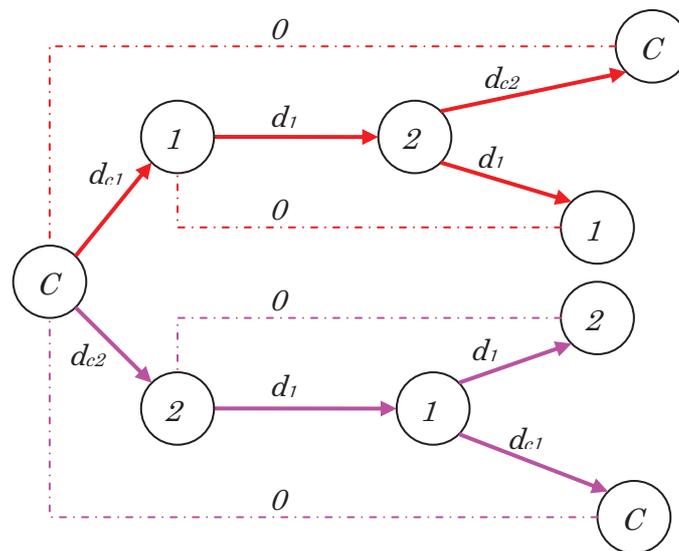


Figure 4.4 Génération des parcours en cas de deux SdP

On applique à la fois les étapes (1,2 et 3) pour avoir la matrice des distances et de maintenance :

- Les données géographiques –en prenant en compte l'hypothèse 1- sont :

$$MD_P = \begin{matrix} c \\ 1 \\ 2 \end{matrix} \begin{bmatrix} 0 & d_{c1} & d_{c2} \\ d_{c1} & 0 & d_{12} \\ d_{c2} & d_{12} & 0 \end{bmatrix}$$

- Les données temporelles –en prenant en compte l'hypothèse 2- sont :

$$V_{MP} = \begin{matrix} c \\ 1 \\ 2 \end{matrix} \begin{bmatrix} \mu_c & \alpha & \delta_c \\ dbf & dMP & \delta_1 \\ dbf & dMP & \delta_2 \end{bmatrix}$$

Application ; Cas de deux sites de production

En prenant toutes les données respectant les conditions (4.2), (4.7) et (4.9). Les équations (4.15) et (4.16) calculent les distances pour chaque parcours possible en fonction de x le nombre de cycles réalisés entre les SdP avant le retour à l'AdMc.

$$\text{Cas 1 : } C \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow C \quad C_R = a \cdot x + b = (d_{12} + d_{12}) x + (d_{c1} + d_{c2}) \quad (4.15)$$

$$\text{Cas 2 : } C \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow C \quad C_R = a \cdot x + b = (d_{12} + d_{12}) x + (d_{c1} + d_{c2}) \quad (4.16)$$

**/Remarque :*

Nous considérons, la capacité du stockage de l'AdMm correspondant à un lot, un lot contient un nombre des pièces correspondant à n nombre des SdP. Au niveau de chaque SdP, on consomme une seule pièce de rechange

□

Selon cette remarque, pour un cycle de SdP à visiter, on consomme un lot de pièces de rechange.

Dans le cas de deux SdP, les équations (4.15) et (4.16) donnent le même résultat, et les deux parcours de la vue des distances des parcours ainsi que les coûts sont égaux. La Figure 4.5 montre le regroupement de ces deux cas.

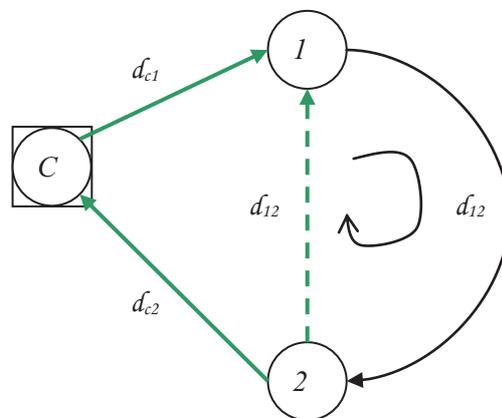


Figure 4.5 Générer les parcours en cas de deux SdP

La courbe de la Figure 4.6 représente cette équation qui correspond à une droite de pente égale à $2d_{12}$.

$b = d_{c1} + d_{c2}$: représente la somme des distances entre l'AdMc et le premier SdP dans la planification des SdP à visiter et entre l'AdMc et le dernier SdP dans cette liste.

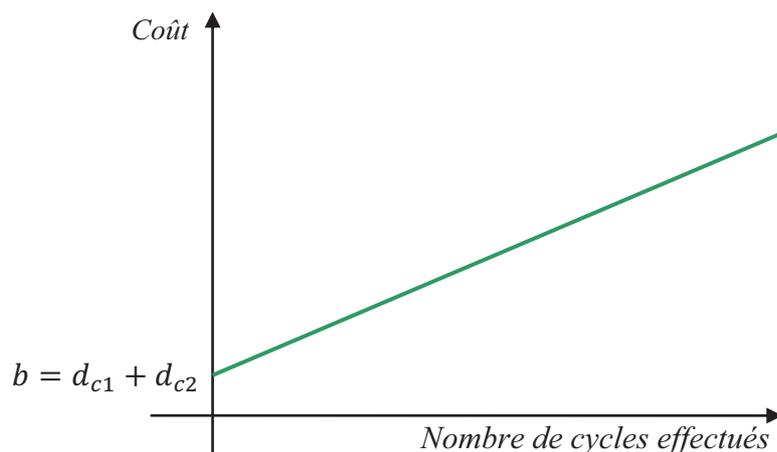


Figure 4.6 Coût de déplacement, cas de deux SdP

Alors, on écrit pour le cas de deux sites de production :

$$C_R = a \cdot x + b = (d_{12} + d_{12}) x + (d_{c1} + d_{c2}) \quad (4.17)$$

**Remarque :*

Dans l'équation (4.17), $b = (d_{c1} + d_{c2})$ représente la position de l'AdMc par rapport aux SdP. Le coût sera optimisé grâce à un choix judicieux de l'atelier central. On peut donc minimiser ce terme en prenant l'AdMc dans un de deux sites de production.

□

4.7 Application ; Cas de trois sites de production

Le nombre de parcours possibles N dépend du nombre de sites de production n donné par l'équation (4.14).

Dans le cas de trois SdP : $N = 3! = 6$ parcours possibles.

Ces parcours sont représentés par la Figure 4.7 .

On applique donc les étapes 1, 2 et 3 qui nous permettent d'obtenir la matrice des distances et des données de maintenance suivantes :

$$MD_P = \begin{matrix} & C \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & d_{c1} & d_{c2} & d_{c3} \\ d_{c1} & 0 & d_{12} & d_{13} \\ d_{c2} & d_{12} & 0 & d_{23} \\ d_{c3} & d_{13} & d_{23} & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \qquad V_{MP} = \begin{matrix} & C \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} \mu_c & \alpha & \delta_c \\ dbf & dMP & \delta_1 \\ dbf & dMP & \delta_2 \\ dbf & dMP & \delta_3 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

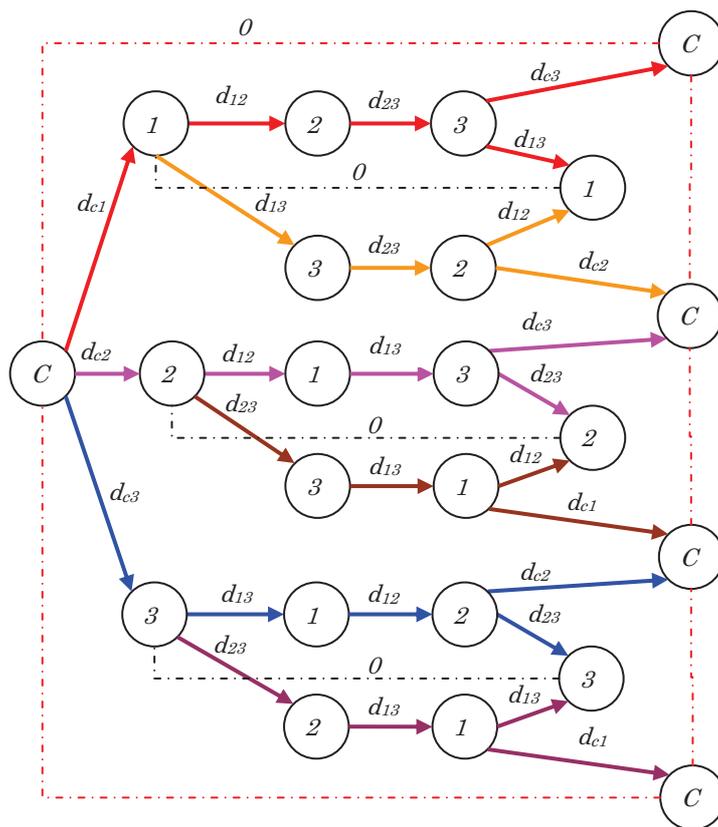


Figure 4.7 Génération des parcours en cas de trois SdP

Dans la phase de vérification, nous considérons que l'ensemble des données respectent les conditions (4.2), (4.7) et (4.9). Les six équations (4.18) à (4.23) correspondantes aux différents parcours possibles, permettent de calculer les distances pour chaque parcours possible en fonction de x (le nombre de cycles réalisés).

$$\text{Cas 1 : } C \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow C \quad C_R = (d_{12} + d_{23} + d_{13})x + (d_{c1} + d_{c3}) \quad (4.18)$$

$$\text{Cas 2 : } C \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow C \quad C_R = (d_{13} + d_{23} + d_{12})x + (d_{c1} + d_{c2}) \quad (4.19)$$

$$\text{Cas 3 : } C \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow C \quad C_R = (d_{12} + d_{13} + d_{13})x + (d_{c2} + d_{c3}) \quad (4.20)$$

$$\text{Cas 4 : } C \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow C \quad C_R = (d_{13} + d_{23} + d_{12})x + (d_{c1} + d_{c2}) \quad (4.21)$$

$$\text{Cas 5 : } C \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow C \quad C_R = (d_{12} + d_{13} + d_{13})x + (d_{c2} + d_{c3}) \quad (4.22)$$

$$\text{Cas 6 : } C \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow C \quad C_R = (d_{12} + d_{23} + d_{13})x + (d_{c1} + d_{c3}) \quad (4.23)$$

On est devant trois expressions de coûts différents, où chaque paire de cas donne le même coût de routage. Ces paires de cas sont : les cas 1 et 6, les cas 2 et 4, et les cas 3 et 5. On écrit donc :

$$\begin{array}{l} \text{C} \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow \text{C} \\ \text{Cas 1 et 6 :} \quad \text{Ou} \quad C_R = (d_{12} + d_{23} + d_{13}) x + (d_{c1} + d_{c3}) \quad (4.24) \\ \text{C} \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow \text{C} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{C} \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow \text{C} \\ \text{Cas 2 et 4 :} \quad \text{Ou} \quad C_R = (d_{13} + d_{23} + d_{12}) x + (d_{c1} + d_{c2}) \quad (4.25) \\ \text{C} \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow \text{C} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \text{C} \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow \text{C} \\ \text{Cas 3 et 5 :} \quad \text{Ou} \quad C_R = (d_{12} + d_{13} + d_{23}) x + (d_{c2} + d_{c3}) \quad (4.26) \\ \text{C} \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow \text{C} \end{array}$$

On remarque que pour les équations (4.24), (4.25) et (4.26), la pente est la même, égale à :

$$a_1 = a_2 = a_3 = (d_{12} + d_{13} + d_{23}) \quad (4.27)$$

Donc, le coût optimal sera en fonction de (b) décrit par l'équation générale du coût (4.13). Où :

$$\begin{aligned} b_1 &= (d_{c1} + d_{c3}) \\ b_2 &= (d_{c1} + d_{c2}) \\ b_3 &= (d_{c2} + d_{c3}) \end{aligned} \quad (4.28)$$

D'après (4.2) on peut écrire :

$$b_2 < b_1 < b_3 \quad (4.29)$$

En conséquence, les courbes suivantes sont obtenues (Figure 4.8):

Application ; Cas complexe de quatre sites de production

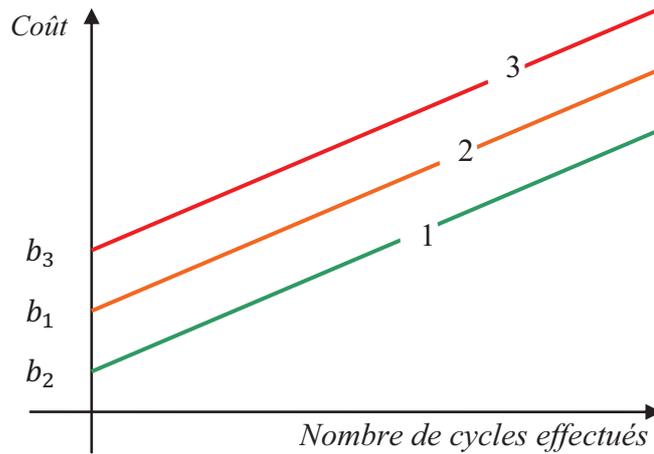


Figure 4.8 Coût de déplacement, cas de trois SdP

Donc, le parcours économique correspond à la courbe (1, verte) sur la Figure 4.8. Celui-ci est un des deux parcours équivalents représentés par la Figure 4.9.

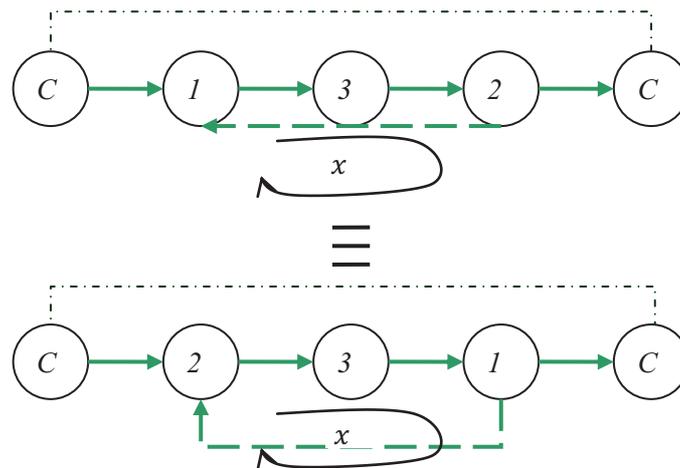


Figure 4.9 Parcours économique, cas de trois SdP.

4.8 Application ; Cas complexe de quatre sites de production

De la même manière que pour les cas précédents, on applique notre méthodologie pour un système de production de quatre sites.

La0, montre les parcours possibles pour ce cas de quatre sites.

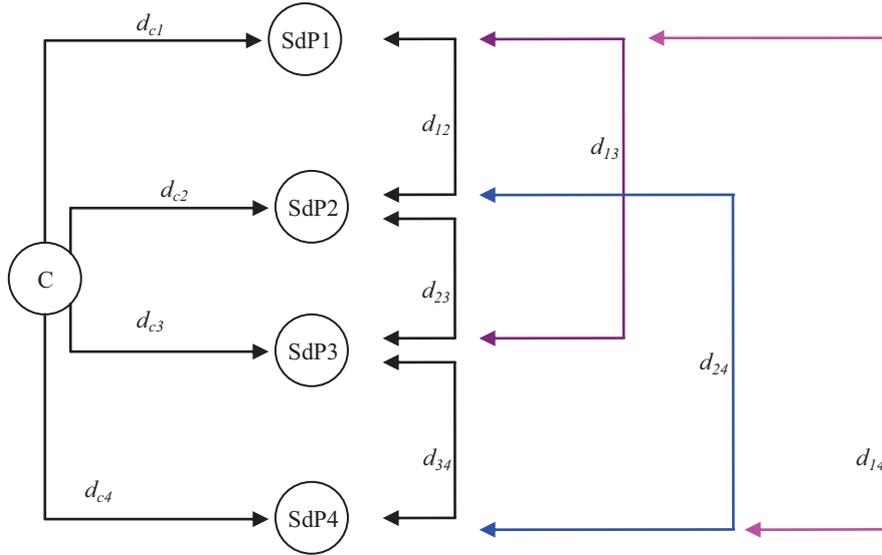


Figure 4.10 Parcours possibles, cas de quatre SdP.

Le nombre des parcours possibles N est alors : $N = 4! = 24$ parcours possibles.

On commence alors par l'acquisition des données suivantes :

$$MD_P = \begin{matrix} C \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} \end{matrix} \begin{bmatrix} 0 & d_{c1} & d_{c2} & d_{c3} & d_{c4} \\ d_{c1} & 0 & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ d_{c2} & d_{12} & 0 & d_{23} & d_{24} \\ d_{c3} & d_{13} & d_{23} & 0 & d_{34} \\ d_{c4} & d_{14} & d_{24} & d_{34} & 0 \end{bmatrix}$$

$$V_{MP} = \begin{matrix} C \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} \end{matrix} \begin{bmatrix} \mu_c & \alpha & \delta_c \\ dbf & dMP & \delta_1 \\ dbf & dMP & \delta_2 \\ dbf & dMP & \delta_3 \\ dbf & dMP & \delta_4 \end{bmatrix}$$

Pour calculer le coût de routage, on applique l'équation (4.13). En fonction de x (nombre de cycles effectués), on obtient les 24 équations des droites détaillées dans l'Annexe B [1]. L'ensemble de ces équations représentent le coût différent parcours possibles caractérisées par trois pentes différentes a_1 à a_3 et six constantes b_1 à b_6 . Un récapitulatif est donné dans le tableau suivant :

$C_R = a \cdot x + b$	
$a_1 = (d_{12} + d_{23} + d_{34} + d_{14})$	$b_1 = (d_{c1} + d_{c2})$
$a_2 = (d_{12} + d_{24} + d_{34} + d_{13})$	$b_2 = (d_{c1} + d_{c3})$
$a_3 = (d_{13} + d_{23} + d_{24} + d_{14})$	$b_3 = (d_{c1} + d_{c4})$
	$b_4 = (d_{c2} + d_{c3})$
	$b_5 = (d_{c2} + d_{c4})$
	$b_6 = (d_{c3} + d_{c4})$

Application ; Cas complexe de quatre sites de production

Par conséquent, on a 18 coûts différents. Ces coûts sont représentés par les courbes sur la Figure 4.11 . Pour une meilleure visibilité, nous ne montrons sur cette figure que les quatre équations :

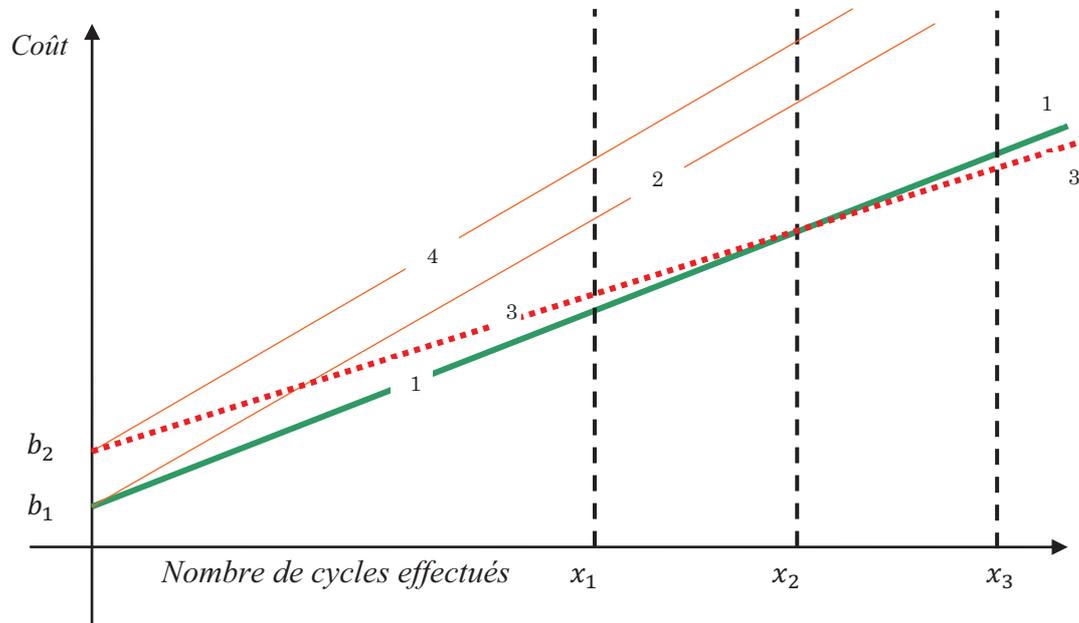


Figure 4.11 Coûts de déplacement (Routage), cas de quatre SdP

Sur la Figure 4.11 , considérons le cas où $a_3 < a_1$ (courbes 1 et 3). Le choix du parcours optimal est conditionné par le nombre de cycles correspondant à un budget donné.

- Si le nombre de cycles est inférieur à x_2 , nous nous baserons sur l'équation a_1x+b_1 , représentée par la droite 1.
- Si le nombre de cycles est supérieur à x_2 , nous nous baserons sur l'équation a_3x+b_2 , représentée par la droite 3.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons prouvé que, quel que soit le nombre de Sites de Production, quel que soit le budget donné, la méthodologie proposée nous permet d'évaluer le coût de déplacement à partir des données entrées sur la situation de l'ensemble des sites de production et l'AdMc. Cette méthodologie génère les parcours techniquement possibles.

Dans le chapitre suivant, on va chercher évaluer et optimiser le coût de ces parcours afin de prendre la décision la plus économique.

Application ; Cas complexe de quatre sites de production

5 Chapitre V

Application – Simulation – Évaluation



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 dix sites 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.

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. Nous allons alors détailler en plus particulièrement un modèle STATEFLOW du générateur d'événements aléatoires et un modèle d'un site de production.

En conséquence, 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.

5.1 Outil de simulation

Le logiciel MATLAB, son nom provient de « MATrix LABoratory ». C'est un langage de programmation bien adapté aux calculs scientifiques. Il est considéré comme le noyau d'un ensemble d'outils logiciels dédiés au calcul scientifique. C'est un logiciel très utilisé dans les universités et les laboratoires industriels.

Simulink de MATLAB : est un outil informatique dédié à la simulation du fonctionnement des systèmes continus ou échantillonnés, représentés simplement par leur schéma-bloc. Il renferme différentes toolbox parmi les quels nous utiliserons pour la simulation de notre problème la toolbox STATEFLOW.

STATEFLOW est un outil graphique puissant de **conception**, et de **développement** pour la commande complexe, et les problèmes de logique et de surveillance (RIVOIRE M., FERRIER J-L., 2001[53]) (Figure 5.1).

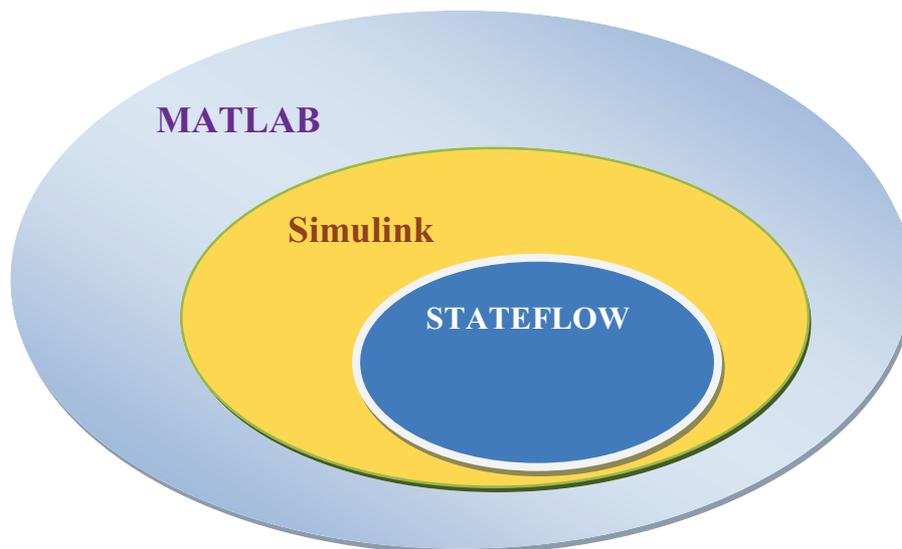


Figure 5.1 Présentation de STATEFLOW, hiérarchie dans MATLAB.

Cet outil a été développé spécialement pour la représentation des systèmes à événements discrets et la simulation de leur fonctionnement. Grâce à une communication parfaite avec Simulink, il renforce sa capacité de prise en compte des séquences logiques.

Le plus haut de la hiérarchie d'un modèle STATEFLOW est appelé Machine (issu du concept de Machine à états finis) qui est le parent d'un ou de plusieurs diagrammes STATEFLOW. Dans ce modèle, le passage d'un état à un autre est conditionné par des événements discrets (horloge ou variable interne/externe).

Modèle boites noires

Le deuxième niveau est le diagramme (graphe) STATEFLOW (chart) qui décrit une partie de la machine, il regroupe l'ensemble des états élémentaires reliés par des arcs (Transitions).

Le fonctionnement du système est décrit au niveau de l'état (state). A titre d'exemple, une machine est décrite par un ensemble d'états (état de marche, de repos, ou de panne).

Les événements à l'entrée du graphe (chart) peuvent déclencher le fonctionnement des transitions (franchissables) et faire évoluer le fonctionnement du système d'un état à un autre.

5.2 Modèle boites noires

Ce modèle STATEFLOW est représenté par la Figure 5.2, il montre une boîte noire pour chaque modèle présenté par RdPSGSyI dans le chapitre 3. De plus, un modèle (modèle de contrôle) permet la prise en compte de fonctions nécessaires à la simulation de notre système. Parmi les fonctions programmées on peut citer :

- Génération d'événement aléatoire
- Calcul du taux de panne
- Calcul des coûts
- Mise en forme des résultats

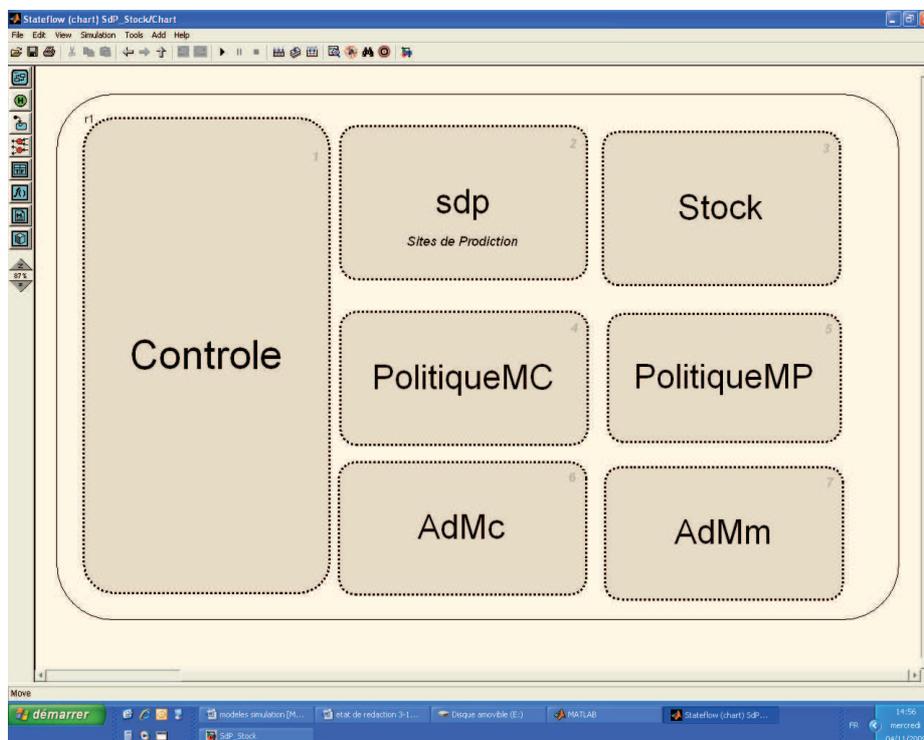


Figure 5.2 Modèle STATEFLOW des boites noires

5.3 Modèle Simulation du Stock :

La Figure 5.3 représente le modèle du Stock / Simulink. Un (chart) fermé, contenant le modèle du stock / STATEFLOW. Un (Pulse Generator) qui réalise la synchronisation entre ce modèle et les autres modèles du système. Les entrées de 1 à 4 sont respectivement la capacité du stock, début de maintenance (préventive ou corrective), fin de maintenance (préventive ou corrective) et l'événement de réapprovisionnement.

À la sortie de ce modèle, nous avons des signaux envoyés au module de contrôle ou à d'autre sous-modèle du système. Ces signaux sont pièce / place disponible dans le stock, et le signal «sln : stock nul » qui est la condition de retour vers l'AdMc.

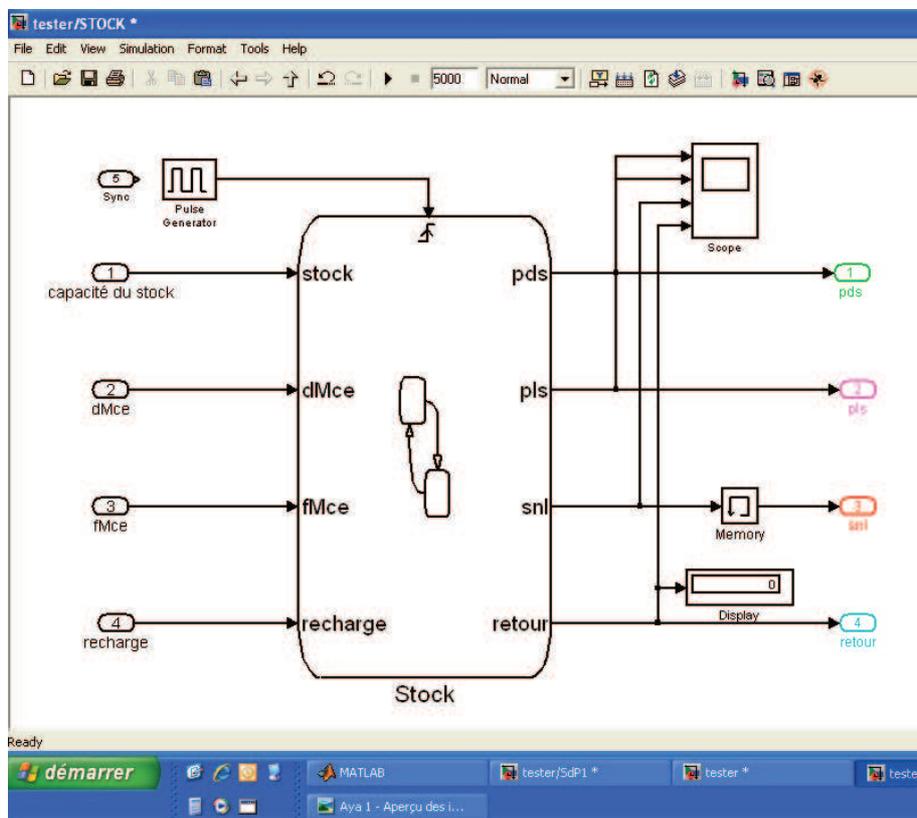


Figure 5.3 Modèle Stock / SIMULINK

La Figure 5.4 représente le modèle du Stock qui montre les contenants du graphe (chart) de la Figure 5.3, c'est la traduction en format STATEFLOW du modèle RdPSGSyI obtenu dans le chapitre 3 représenté par la Figure 3.6.

L'arc reliant l'état P1 et P2 représente la transition T1 conditionnée par l'événement début de maintenance (préventive ou corrective). Pour simplifier la lecture et faire la comparaison entre les deux modèles, nous avons gardé la même notation des états du modèle RdPSGSyI (P1, P2 et P3) dans le modèle représenté par STATEFLOW.

Modèle de Simulation du Site de Production SdP :

À chaque passage de P1 à P2 / STATEFLOW, nous enlevons une pièce du stock de pièce neuves/réparées (P2/ pds --) et nous rajouterons une pièce défectueuse au stock représentant des pièces défaillantes (P2/ pls ++).

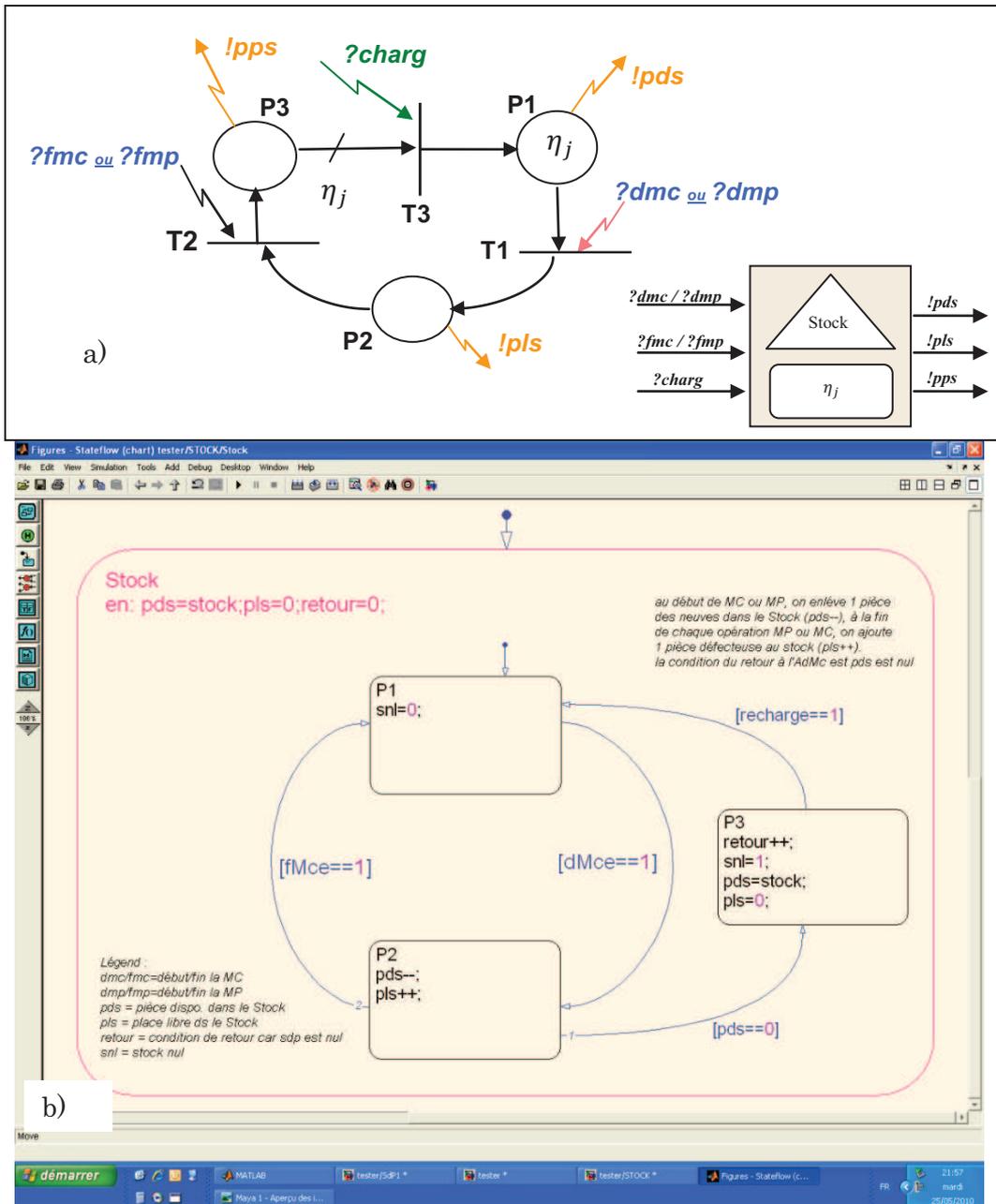


Figure 5.4 Modèle Stock : a) modèle Stock/ RdPSGSyI
 b) modèle Stock STATEFLOW

5.4 Modèle de Simulation du Site de Production SdP :

La Figure 5.5 représente le modèle du SdP / Simulink. Un graphe (chart) appelé SdP, contenant le modèle du SdP / STATEFLOW. Un (Pulse Generator) réalise la synchronisation entre ce modèle et les autres modèles du système. Les entrées sont : le

taux de service (production), le taux moyen d'une activité de maintenance (préventive et /ou corrective), le taux de bon fonctionnement entre deux dates de MP et l'événement annonçant l'arrivé de l'AdMm au SdP.

À la sortie de ce modèle, nous trouvons plusieurs signaux envoyés au module de contrôle ou d'autres sous-modèles du système. Ce sont des événements comme début/fin de maintenance (préventive et/ou corrective) et la présence de panne. De plus, ce modèle délivre en sortie des données temporelles comme le temps d'attente de l'AdMm pour le calcul de l'indisponibilité du site.

La Figure 5.5 représente le modèle du SdP montrant les contenants du graphe (chart, SdP). Dans la Figure 5.6, nous l'avons regroupé avec le modèle RdPSGSyI obtenu dans le chapitre 3 représenté par la Figure 3.10.

Chaque état STATEFLOW représente un état du système modélisé par RdPSGSyI, ainsi que les différentes fonctions caractérisant cet état.

Dès l'occurrence d'une panne, le module de gestion des arrêts « arreterMC » est alors activé avec le décomptage du temps d'attente de l'AdMm. Durant toute le période d'arrêt pour réparation, on considère qu'il n'y a pas de production. Le même principe de décomptage (attente et remplacement) sera utilisé pour le cas de maintenance préventive. Cette durée d'attente est prise en compte pour calculer le coût d'attente.

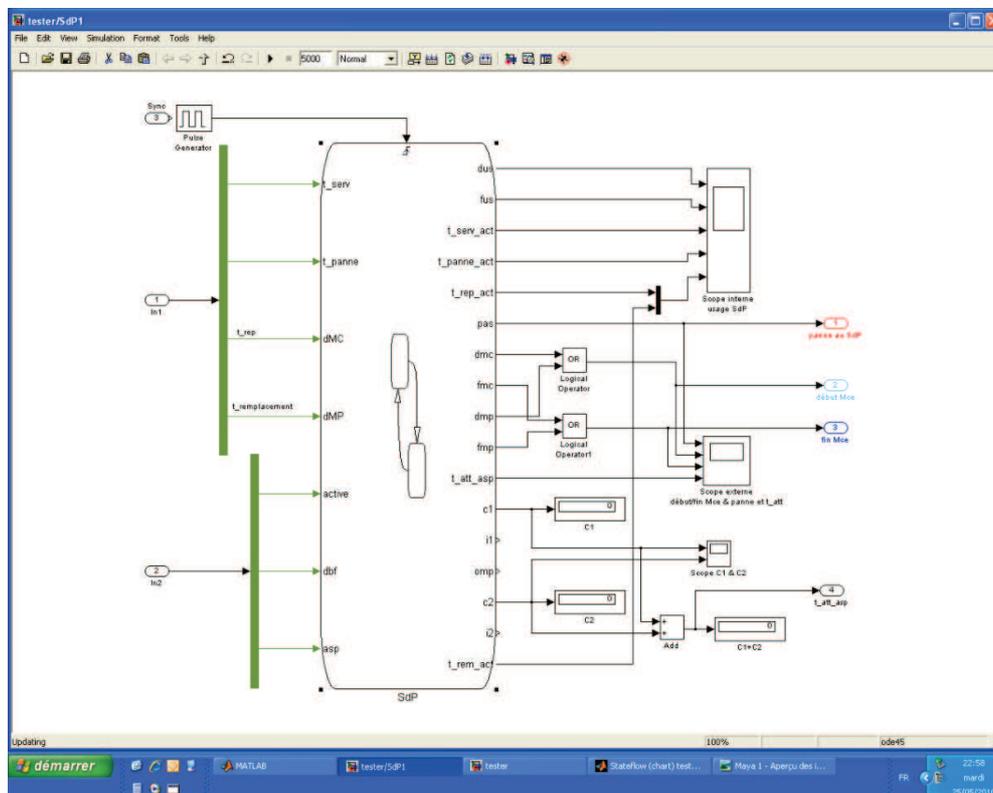


Figure 5.5 Modèle SdP / SIMULINK

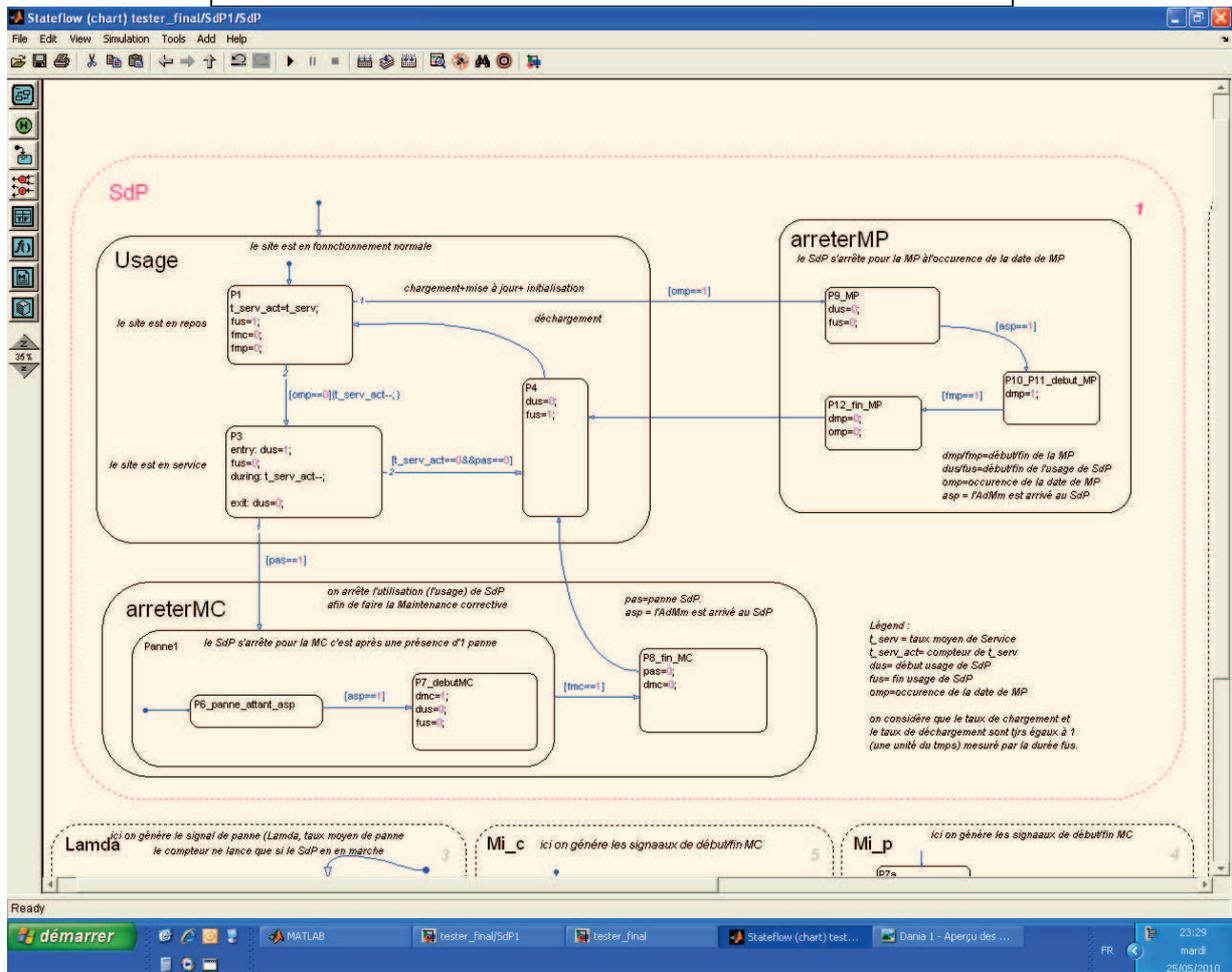
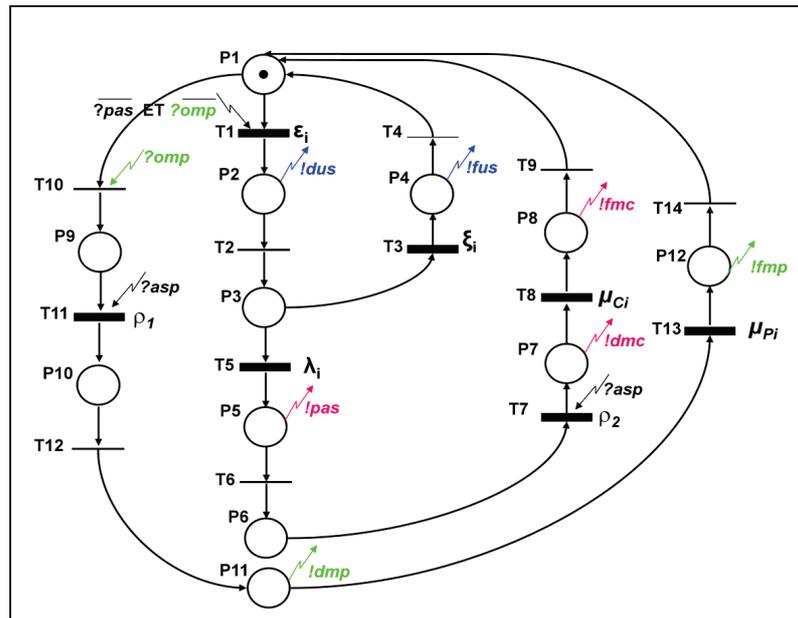


Figure 5.6 a) Modèle SdP / RdPSGSyI
b) Modèle SdP / STATEFLOW

5.5 Synthèse des modèles Simulation :

L'outil (MATLAB/ Simulink/ STATEFLOW) a le pouvoir de simuler les modèles RdPSGSyI. Grâce à ce pouvoir nous pouvons évaluer les coûts et les performances de notre système.

Tous les modèles de simulation et les fonctions auxiliaires sont présentés en Annexe. Pour une meilleure compréhension, nous demanderons aux lecteurs d'avoir les modèles RdPSGSyI obtenus dans le chapitre 3 et de suivre les signaux de synchronisation selon leurs états.

5.6 Évaluation des Indicateurs de performance : exemples d'Application

Plusieurs paramètres interviennent dans le calcul des performances des réseaux d'atelier de maintenance. Pour déterminer les performances optimales en termes de coût et d'indisponibilité, nous allons effectuer une étude de sensibilité à travers différentes simulations. Ainsi, dans un premier temps, une étude de l'influence de la capacité de stockage de l'atelier mobile nous permettra de déterminer sa capacité optimale.

La deuxième étude est consacrée à l'influence de la position de l'AdMc par rapport aux SdP.

Une étude comparative de maintenance centralisée par rapport à une architecture de maintenance distribuée permet de montrer de façon quantitative les avantages d'une telle organisation.

Les différentes simulations ont été réalisées dans un contexte distribué de trois et quatre sites de production avec un calcul du coût total de la solution optimale.

5.6.1 Un réseau d'ateliers de maintenance pour trois sites de production

Dans cet exemple, nous prenons un système manufacturier composé de trois sites de production (SdP₁, SdP₂, SdP₃).

On applique notre approche de maintenance distribuée avec un atelier de maintenance centrale AdMc et un autre mobile AdMm qui seront rajoutés à la structure de ce système.

Nous avons donc la matrice primaire des distances entre les sites et l'AdMc :

$$MD_P = C \begin{bmatrix} 0 & d_{c1} & d_{c2} & d_{c3} \\ 1 & d_{c1} & 0 & d_{12} & d_{13} \\ 2 & d_{c2} & d_{12} & 0 & d_{23} \\ 3 & d_{c3} & d_{13} & d_{23} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 10 & 20 & 24 \\ 10 & 0 & 26 & 32 \\ 20 & 26 & 0 & 25 \\ 24 & 32 & 25 & 0 \end{bmatrix}$$

Le vecteur de périodicité de maintenance est le suivant :

$$V_{MP} = C \begin{bmatrix} \mu_c & \alpha & \delta_c \\ 1 & dbf & dMP & \delta_1 \\ 2 & dbf & dMP & \delta_2 \\ 3 & dbf & dMP & \delta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_c & \alpha & \delta_c \\ 128 & 5 & \delta_1 \\ 128 & 5 & \delta_2 \\ 128 & 5 & \delta_3 \end{bmatrix}$$

Les autres données entrées sont :

t_service	1/5
t_réparation : dMC	1/5
t_panne	1/1500
t_chargement/déchargement	1/6

- 1) Cas de maintenance préventive seule (pas de défaillance au niveau des sites)
- Etude de l'influence de la capacité de stockage de l'AdMm sur le temps d'attente au niveau du site de production :

Nous avons fait varier la capacité de stockage de 1 à 40 lots de l'atelier mobile. La capacité de stockage a un coût direct d'équipements et a aussi une influence sur les coûts de déplacement à travers le nombre de cycles que cet AdMm peut effectuer sans revenir se réapprovisionner au niveau de l'AdMc.

Dans notre simulation, nous avons calculé le temps d'attente de l'AdMm au niveau de chaque SdP.

		Capacité du stock									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t_attente	SdP1	122	92	110	92	108	115	96	92	92	92
	SdP2	147	120	141	120	138	145	122	120	120	120
	SdP3	167	139	160	137	157	164	141	137	137	137
Nombre de cycles effectués		32	16	11	8	6	5	4	4	2	3
t_attente totale		436	351	411	349	403	424	359	349	349	349

		Capacité du stock									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t_attente	SdP1	122	92	110	92	108	115	96	92	92	92
	SdP2	147	120	141	120	138	145	122	120	120	120
	SdP3	167	139	160	137	157	164	141	137	137	137
Nombre de cycles effectués		32	16	11	8	6	5	4	4	2	3
t_attente totale		436	351	411	349	403	424	359	349	349	349

Capacité du stock																
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92
120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137
3	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1
349	349	349	349	349	349	349	349	349	349	349	349	349	349	349	349	349

Capacité du stock												
28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	88
120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
349	349	349	349	349	349	349	349	349	349	349	349	345

**/Remarque :*

Pour pouvoir simuler le cas de maintenance préventive, nous avons choisi le taux de panne très faible, avec ces valeurs aucune occurrence de panne pendant toute la durée de simulation.

□

Ces résultats sont récapitulés dans l'histogramme de Figure 5.7.

On voit bien que l'indisponibilité du système arrive à niveau minimal à partir d'une capacité du stock égale à 8. Ce qui correspond à un nombre de cycles égale à 4 et un temps d'attente total au niveau des trois sites de 349 ut.

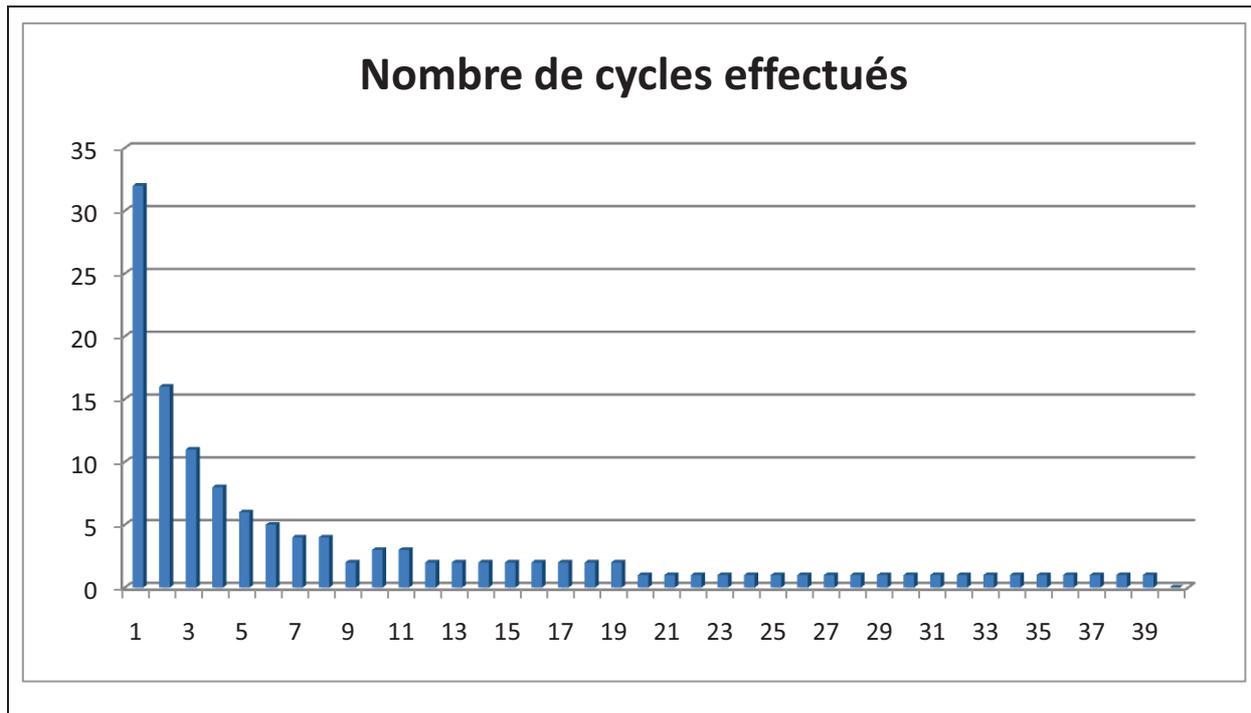


Figure 5.7 Nombre des cycles effectués en fonction de capacité du stock

5.6.2 Un réseau d'ateliers de maintenance pour quatre sites de production

Nous allons appliquer notre démarche à un réseau d'atelier composé de quatre sites de production ($SdP_1, SdP_2, SdP_3, SdP_4$).

Nous appliquons notre approche de maintenance distribuée. Un Atelier de Maintenance Centrale AdMc et un autre Mobile AdMm seront rajoutés à la structure de ce système.

Nous avons donc la matrice primaire des distances suivante :

$$MD_P = \begin{matrix} & C \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & d_{c1} & d_{c2} & d_{c3} & d_{c4} \\ d_{c1} & 0 & d_{12} & d_{13} & d_{14} \\ d_{c2} & d_{12} & 0 & d_{23} & d_{24} \\ d_{c3} & d_{13} & d_{23} & 0 & d_{34} \\ d_{c4} & d_{14} & d_{24} & d_{34} & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{bmatrix} 0 & 10 & 24 & 20 & 32 \\ 10 & 0 & 32 & 26 & 36 \\ 24 & 32 & 0 & 25 & 40 \\ 20 & 26 & 25 & 0 & 27 \\ 32 & 36 & 40 & 27 & 0 \end{bmatrix}$$

Et le vecteur de la périodicité de maintenance suivant :

$$V_{MP} = \begin{matrix} C \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} \begin{bmatrix} \mu_c & \alpha & \delta_c \\ dbf & dMP & \delta_1 \\ dbf & dMP & \delta_2 \\ dbf & dMP & \delta_3 \\ dbf & dMP & \delta_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_c & \alpha & \delta_c \\ 128 & 1 & \delta_1 \\ 128 & 1 & \delta_2 \\ 128 & 1 & \delta_3 \\ 128 & 1 & \delta_4 \end{bmatrix}$$

Les autres données entrées sont :

taux moyen de service	1/5
taux moyen réparation : dMC	1/5
taux de chargement/déchargement	1/6
durée de la simulation	1/1500

Pour cet exemple, les maintenances préventive et corrective sont prises en compte. Nous prendrons pour cette application un taux de panne unique est égale à = 1/80 U.T.

Initialement, pour une capacité de stock = 4 lots :

▪ *Sur le Site de production SdP₁ :*

Le tableau suivant donne les résultats du temps d'attente de l'AdMm au niveau de SdP₁. Le coût d'attente est obtenu en multipliant le temps d'attente par le coefficient associé.

SdP ₁	Cycle	t. attente	dMP	Coût UT.A	Coût total d'att/cyc
	1	0	1	2	0
	2	2	1	2	4
	3	13	1	2	26
	4	4	1	2	8
	5	1	1	2	2
	6	0	1	2	0
	7	0	1	2	0
	8	5	1	2	10
	9	1	1	2	2
	10	0	1	2	0
Totale sur SdP ₁		26			52

Les résultats sont récapitulés dans l'histogramme de la Figure 5.8.

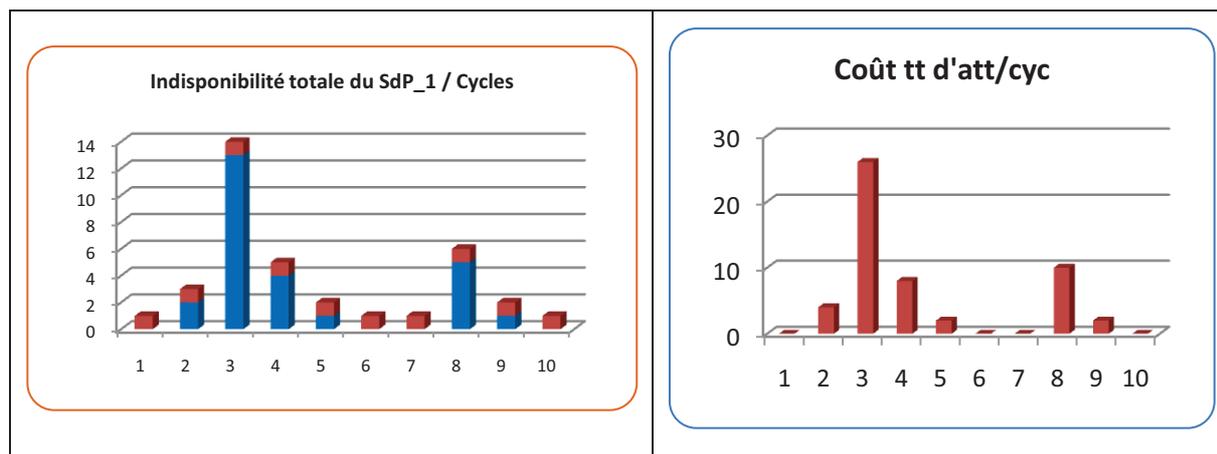


Figure 5.8 Le temps d'attente et coût associé pour SdP_1 , cas de capacité de stock égale à 4

De la même manière que pour le SdP_1 , on a évalué les temps d'attente et les coûts associés pour les sites de production SdP_2 & SdP_3 & SdP_4 ; les résultats obtenus récapitulés dans le chronogramme de la Figure 5.9 qui donne le temps d'attente cumulé.

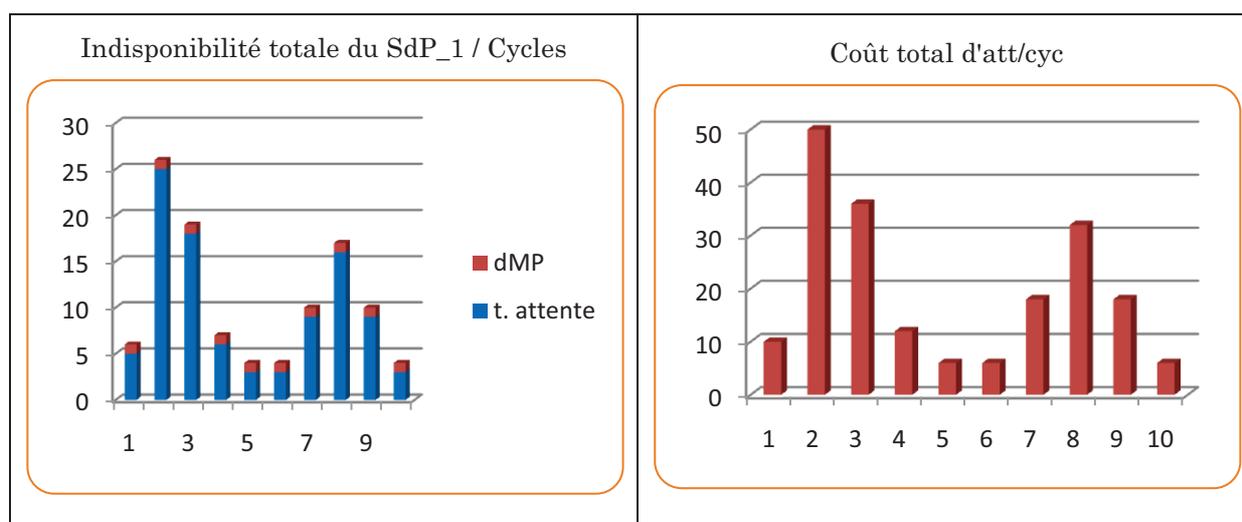


Figure 5.9 Le temps d'attente et le coût associé pour les 4 SdP, cas de capacité de stock égale à 4

Nous avons alors les résultats pour capacité de stock = 4 lots :

Temps total d'attente =	97	unités de temps
Coût total d'attente =	194	unités de coût

Le tableau suivant donne les résultats obtenus pour divers capacités de stock : 5,6 et 7.

Capacité du stock	4	5	6	7
SdP ₁	26	26	20	17
SdP ₂	28	25	20	17
SdP ₃	34	38	34	29
SdP ₄	9	9	10	8
Total	97	98	84	71

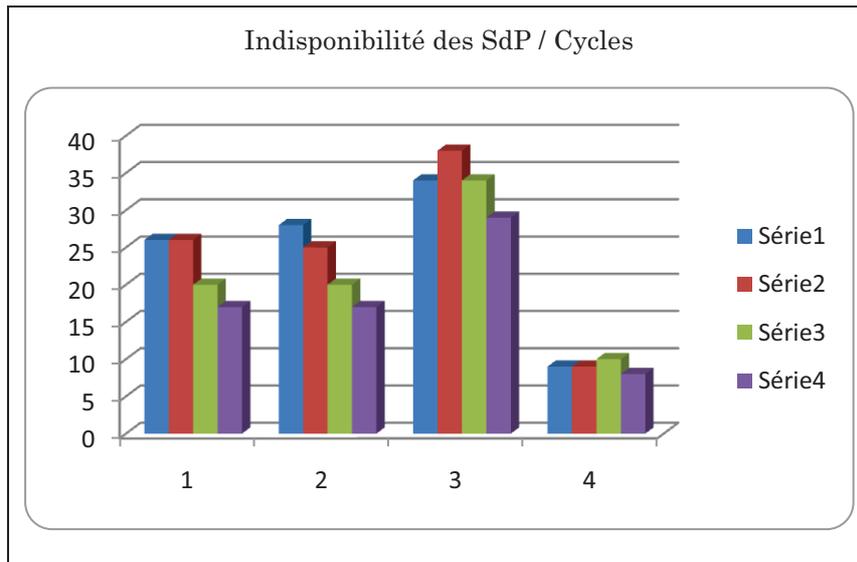


Figure 5.10 Le temps d'attente et le coût associé pour les 4 sites de production en fonction de la capacité de stock

D'après les résultats obtenus, on constate que pour une capacité de 5, le site de production le moins bon économiquement est SdP_3 car il présente un temps d'attente le plus important (Figure 5.10). Par contre, SdP_4 qui présente le plus petit temps d'attente est le meilleur économiquement.

Le cumul de temps d'attente représenté par le chronogramme de la Figure 5.11 montre que le coût optimal correspond bien à la capacité de stockage de 7 lots.

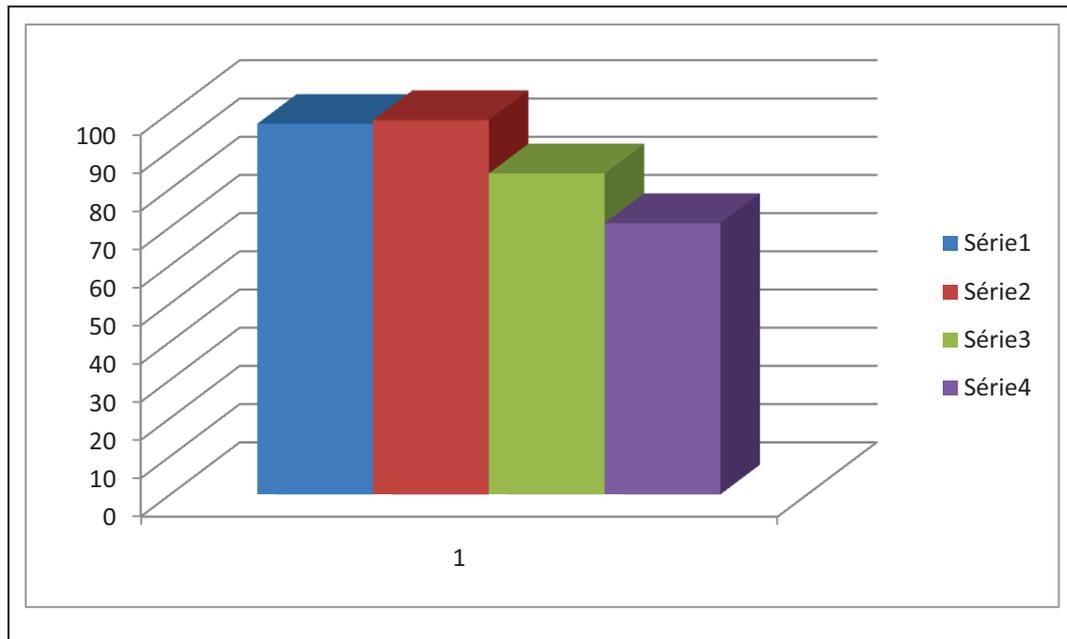


Figure 5.11 Le cumul de temps d'attente pour les 4 sites de production

- Etude de l'influence de la position de l'AdMc, position optimale :

Nous avons étudié le cas de paragraphe §5.6.1., le cas d'un réseau de trois sites de production. Afin d'optimiser le coût de déplacement nous avons simulé l'influence sur les coûts de déplacement de rapprochement de l'AdMc d'un des sites de production. Trois cas de figure peuvent se produire comme le montre la Figure 5.12.

Nous avons donc, la matrice primaire des distances entre les sites et l'AdMc utilisée dans le paragraphe §5.6.1 :

$$MD_P = \begin{matrix} C \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \begin{bmatrix} 0 & d_{c1} & d_{c2} & d_{c3} \\ d_{c1} & 0 & d_{12} & d_{13} \\ d_{c2} & d_{12} & 0 & d_{23} \\ d_{c3} & d_{13} & d_{23} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 10 & 20 & 24 \\ 10 & 0 & 26 & 32 \\ 20 & 26 & 0 & 25 \\ 24 & 32 & 25 & 0 \end{bmatrix}$$

Cas 1 : l'AdMc se place au SdP_1

Dans ce cas, le vecteur des distances entre l'AdMc et les sites de production d_c devient d'_c le suivant :

$$d_c = [d_{c1}, d_{c2}, d_{c3}] \rightarrow d'_c = [0, 26, 32]$$

Pour la matrice (MD_P), on enlève la ligne et la colonne qui sont correspondants au SdP_1 . Nous obtenons donc la matrice primaire des distances entre les sites et l'AdMc, la matrice (MD'_P) où :

$$MD'_P = \begin{matrix} C, 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & d_{13} \\ d_{12} & 0 & d_{23} \\ d_{13} & d_{23} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 26 & 32 \\ 26 & 0 & 25 \\ 32 & 25 & 0 \end{bmatrix}$$

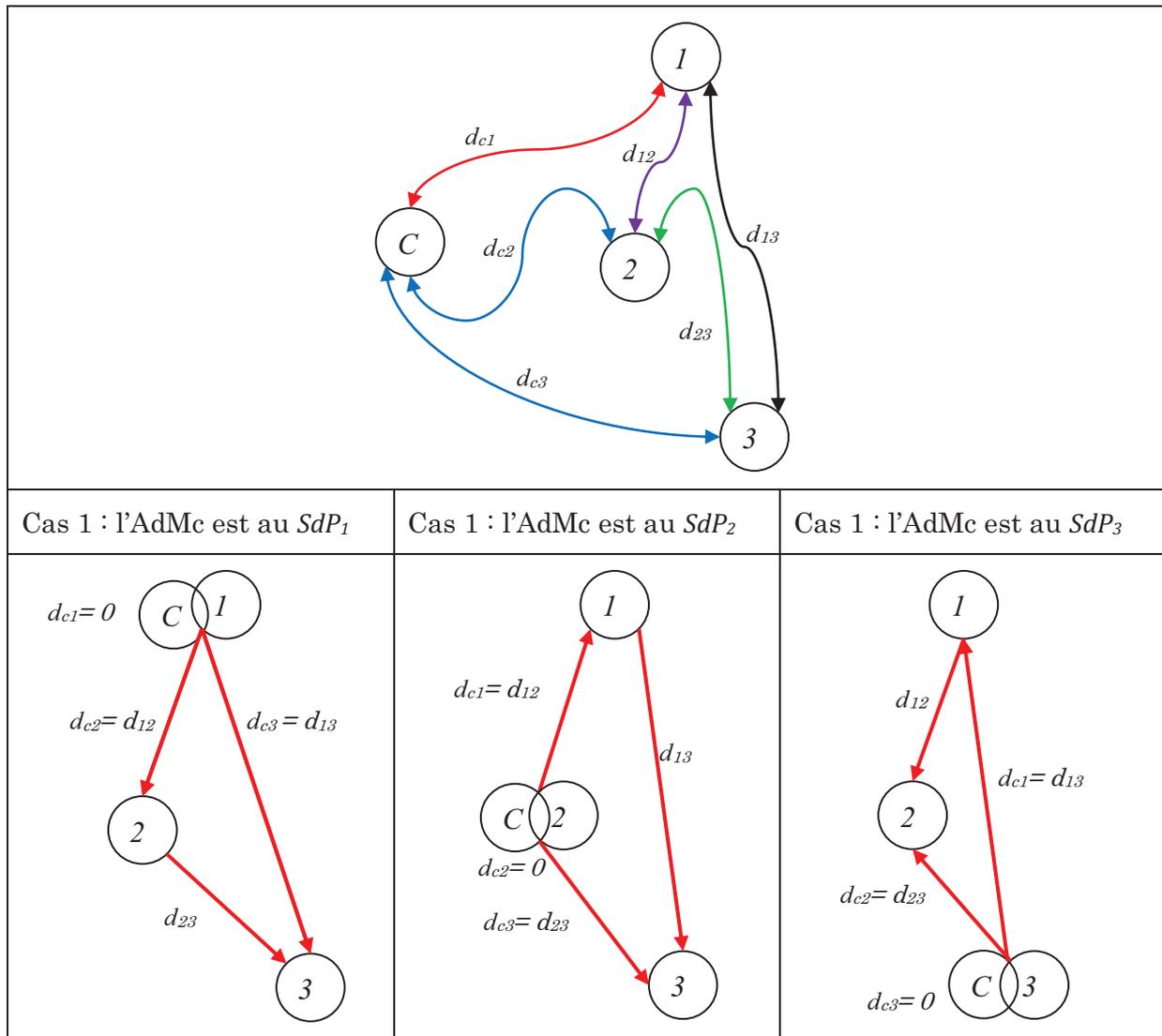


Figure 5.12 Structure de réseau d'ateliers de maintenance à trois sites de production avec un AdMc intégré à un Site

En rappelant les équations (4.28) qui calculent la partie constante dans l'équation du coût de routage avec $d_{c1} = 0$, on obtient :

$$b_1' = (d_{c1}' + d_{c3}') = d_{c3}'$$

$$b_2' = (d_{c1}' + d_{c2}') = d_{c2}'$$

$$b_3' = (d_{c2}' + d_{c3}')$$

D'après (4.2) on a :

$$b_2' < b_1' < b_3'$$

Donc, le parcours économique est un de deux parcours équivalents représentés par la Figure 4.9 .

Cas 2 : l'AdMc se place au SdP_2

Dans ce cas, le vecteur des distances entre l'AdMc et les sites de production d_c devient d_c' le suivant :

$$d_c = [d_{c1}, d_{c2}, d_{c3}] \rightarrow d_c' = [26, 0, 25]$$

Pour la matrice (MD_P) , on enlève la ligne et la colonne qui correspondent au SdP_2 . Nous obtenons donc la matrice primaire des distances entre les sites et l'AdMc, la matrice (MD_P') où :

$$MD_P' = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & d_{13} \\ d_{12} & 0 & d_{23} \\ d_{13} & d_{23} & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{bmatrix} 0 & 26 & 32 \\ 26 & 0 & 25 \\ 32 & 25 & 0 \end{bmatrix}$$

En rappelant les équations (4.28) qui calculent la partie constante dans l'équation du coût de routage avec $d_{c2} = 0$, on obtient :

$$b_1' = (d_{c1}' + d_{c3}')$$

$$b_2' = (d_{c1}' + d_{c2}') = d_{c1}'$$

$$b_3' = (d_{c2}' + d_{c3}') = d_{c3}'$$

D'après (4.2) on a :

$$b_2' < b_1' < b_3'$$

Donc, le parcours économique est un de deux parcours équivalents représentés par la Figure 4.9 .

Cas 3 : l'AdMc se place au SdP_3

Dans ce cas, le vecteur des distances entre l'AdMc et les sites de production d_c devient d_c' le suivant :

$$d_c = [d_{c1}, d_{c2}, d_{c3}] \rightarrow d_c' = [32, 25, 0]$$

Pour la matrice (MD_P) , on enlève la ligne et la colonne qui correspondent au SdP_2 . Nous obtenons donc la matrice primaire des distances entre les sites et l'AdMc, la matrice (MD_P') où :

$$MD_P' = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & d_{12} & d_{13} \\ d_{12} & 0 & d_{23} \\ d_{13} & d_{23} & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{bmatrix} 0 & 26 & 32 \\ 26 & 0 & 25 \\ 32 & 25 & 0 \end{bmatrix}$$

En rappelant les équations (4.28) qui calculent la partie constante dans l'équation du coût de routage. On met ($d_{c3} = 0$), on obtient :

$$b_1' = (d_{c1}' + d_{c3}') = d_{c1}'$$

$$b_2' = (d_{c1}' + d_{c2}')$$

$$b_3' = (d_{c2}' + d_{c3}') = d_{c2}'$$

D'après (4.2) on a :

$$b_1' < b_3' < b_2'$$

Donc, le parcours économique est un de deux parcours équivalents représentés par la Figure 5.13.

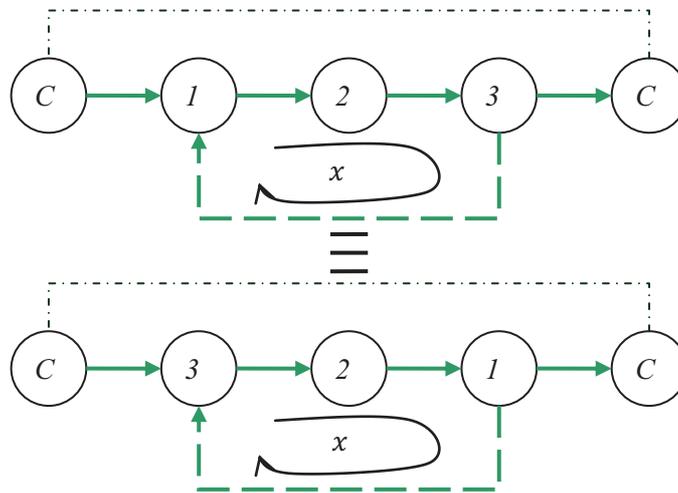


Figure 5.13 Parcours économique, cas de trois SdP, l'AdMc est au SdP_3

Les résultats de simulation montrent qu'il est plus avantageux d'associer l'AdMc à un de site de production. Les performances du réseau d'atelier seront évaluer en fonction d'une part de la l'indisponibilité des sites de production (temps d'attente et temps d'arr^t pour maintenance) et d'autre part en fonction du coût de maintenance (coûts de déplacement et les coûts de stockage).

Par rapport à la disponibilité, les résultats de simulation montrent que :

- La plus faible indisponibilité est obtenue à partir d'une capacité de stockage égale à 11 lots lorsque l'AdMm se trouve au niveau de SdP2.

Par rapport coût, les résultats de simulation montrent que :

- Le coût minimal est obtenu à partir d'une capacité de stockage égale à 12 lots lorsque l'AdMm se trouve au niveau de SdP2

Évaluation des Indicateurs de performance : exemples d'Application

De plus si l'on compare la structure classique de maintenance où un atelier local est associé à chaque site de production la simulation montre qu'à partir d'un stock de 5 lots, on obtient un gain croissant au niveau des coûts de la maintenance. Le gain est maximal pour une capacité de stockage de 12 lots. Dès que la zone de stockage dépasse 17 lots, cette structure n'est plus rentable.

Pour le jeu de paramètres utilisés, le choix optimal revient au positionnement de l'AdMm au niveau du site 2 avec une capacité de stockage de 12 lots.

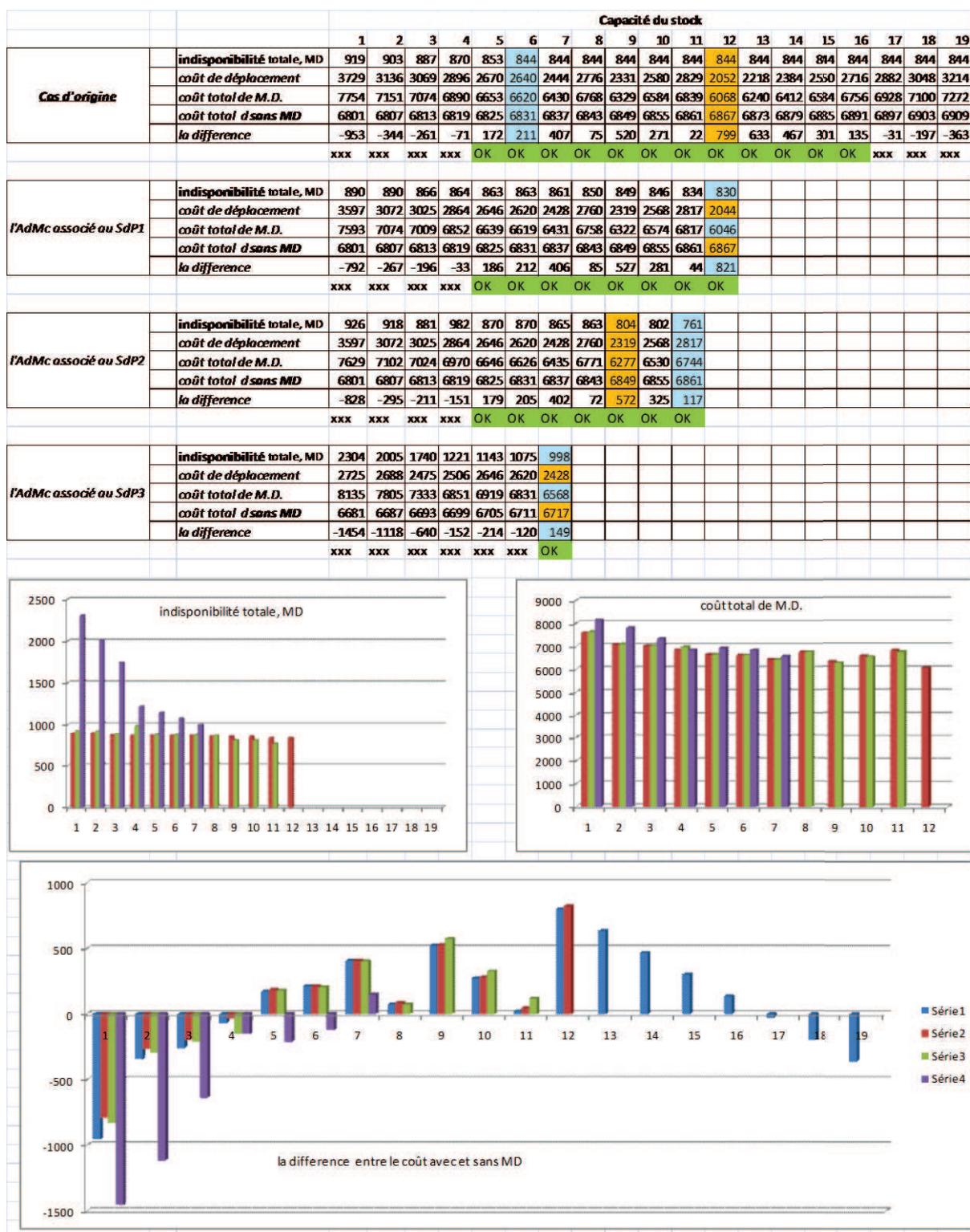


Figure 5.14 Résultat de simulation sur l'influence de l'emplacement de l'atelier central

6 Conclusion générale et perspectives

Dans cette thèse, 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.

Une des principales contributions de cette recherche est la mise en œuvre de la méthodologie d'une maintenance distribuée dans les systèmes de production.

Au début, de l'état de l'art sur les activités de maintenance effectuées, en général, les systèmes de production, nous avons remarqué que l'entretien des systèmes de production est soit intégrée (interne) ou externalisée (sous-traitant). Notre problématique a été axée sur la création d'un système de maintenance dans une entreprise (un système) avec plusieurs sites de production séparés par des distances non négligeable.

Nous avons constaté que la fonction de maintenance dans une entreprise est nécessaire à plus d'un titre, dans la mesure où elle lui assure une performance globale conjuguée avec une rentabilité importante.

Nous avons montré les avantages de notre approche mais aussi les inconvénients et surtout le nombre important des contraintes.

Au fur et à mesure du développement des besoins de l'entreprise et de ses fonctions, cette activité a connu des évolutions en passant d'une maintenance corrective, puis vers les stratégies préventives puis vers les stratégies prévisionnelles.

Les fonctions de l'atelier de maintenance sont réparties entre les services suivants : Service méthode de maintenance, Service décision et ordonnancement et Service réalisation

Notre approche de la maintenance distribuée quant à elle est un nouveau concept qui nous permet de manager en fonction des caractéristiques des sites existants, les ressources humaines et matérielles disponibles et la politique de gestion d'entreprise.

En ce qui concerne les indicateurs de performance, on a retenu dans notre travail le « temps d'indisponibilité d'un site » et le coût de maintenance.

De plus, dans notre travail, nous avons essayé de prouver que, quelque soit le nombre de Sites de Production, le budget donné, la méthodologie proposée nous a aidé à évaluer le coût de déplacement à partir des données d'entrée sur la situation de l'ensemble des sites et l'AdMc. Néanmoins, le parcours générés est techniquement

possible, c'est pour cette raison qu'on a tenté de chercher à optimiser le coût de ces parcours afin de prendre la stratégie la moins onéreuse.

La simulation des différents ateliers synchronisés permet d'analyser et d'évaluer les performances de maintenance (disponibilité, indisponibilité, 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.

7 Bibliographie

- [1] 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.
- [2] ABBOU R., SIMEU-ABAZI Z., DI-MASCOLO M., 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.
- [3] ADJALLAH Kondo H., ADZAKPA K., 2003. *Minimisation du temps de séjour pondéré avec dates de disponibilité inégales des tâches: application à la maintenance*. MOSIM'03 - Toulouse France.
- [4] AÏT-KADI D., NOURELFATH M., 2007. *OPTIMIZATION OF SERIES-PARALLEL MULTI-STATE SYSTEMS UNDER MAINTENANCE POLICIES*. Reliability Engineering and System Safety 92 (2007), pages1620-1626.
- [5] AÏT-KADI D., NOURELFATH M., SORO I-W., 2010. *Performance evaluation of multi-state degraded systems with minimal repairs and imperfect preventive maintenance*. Reliability Engineering and System Safety 95 (2010), pages 65-69.
- [6] AFNOR, Recueil des norms française X06, X 50, X60, AFNOR.
- [7] ALALI ALHOUIJ A. , SIMEU-ABAZI Z. , ALLA H, 2006. *Ordonnancement Robuste des Tâches de Maintenance Préventive*. MMR'06, Rabat, Maroc.
- [8] ALALI ALHOUIJ A. , SIMEU-ABAZI Z. , ALLA H, 2008. *Modélisation modulaire des activités de maintenance dans une structure Multi-sites*. MOSIM'08, Paris, France.
- [9] ALALI ALHOUIJ A. , SIMEU-ABAZI Z. , ALLA H, 2008. *MODULAR MODELING OF MAINTENANCE ACTIVITIES For Multi-Sites Structure*. IFAC/IMS'08, Szczecin, Poland.
- [10] ALALI ALHOUIJ A. , SIMEU-ABAZI Z. , ALLA H, 2009. *MODULAR MODELING*. IESC2008, Aleppo, Syrie.
- [11] ANDERSEN T. M., RASMUSSEN M., 1999. *DECISION SUPPORT IN A CONDITION BASED ENVIRONMENT*. Journal of Quality in maintenance, Vol. 5, No. 2, pp. 89-101.
- [12] BANERJEE A., FLYNN B. (1987). *A SIMULATION STUDY OF SOME MAINTENANCE POLICIES IN A GROUP TECHNOLOGIE SHOP*. International Journal of Production Research, vol. 25, n°11, pages 1595-1609.
- [13] BLANCHARD B. S., 1986. *LOGISTICS ENGINEERING AND MANAGEMENT*. 3rd edition, Prentice-Hall, Inc., Englewood cliffs, New Jersey, Etats-Unis, 1986.
- [14] BUTLER A., 2001. *LOGGIES VS. CONTRACTOR*. Air Force Magazine, Washington, Etats-Unis. Vol. 84, No. 1, pp. 70-74.

- [15] 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.
- [16] CAHLINK G., 2001. *DRAINED: THE DEFENSE DEPARTMENT'S DEBILITATING LOSS OF CRITICAL WORKERS*. Government executive, Washington, Etats-Unis., Vol. 33, No. 2, pp. 22-28.
- [17] Charles A-S., 2000. *Modélisation des défaillances des équipements d'une unité de production de composants électroniques. Optimisation des stratégies de maintenance*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.
- [18] CHÂTELET E., BERENGUERAND C., JELLOULI O., 2002. *PERFORMANCE ASSESSMENT OF COMPLEX MAINTENANCE POLICIES USING STOCHASTIC PETRI NETS*. Lambda-Mu 13 Lyon ESREL 2002, pages 532-537.
- [19] CUIGNET R., 2002. *Management de la maintenance*. Edition DUNOD.
- [20] Daniel O. 1995. *Les Réseaux de Petri Stochastiques pour l'évaluation des attributs de la sûreté de fonctionnement des systèmes manufacturiers*. Thèse de Doctorat, LAG Laboratoire d'Automatique de Grenoble.
- [21] DEBORDE R., GEORJON A., 1999. *Maintenance des systèmes industriels*. Edition HACHETTE Technique.
- [22] DEKKER R. (1996). *APPLICATIONS OF MAINTENANCE OPTIMIZATION MODELS : A REVIEW AND ANALYSIS*. Reliability Engineering and System Safety, n°51, pages 229-240.
- [23] DEKKER R., 1995. *INTEGRATING OPTIMISATION, PRIORITY SETTING, PLANNING AND COMBINING OF MAINTENANCE ACTIVITIES*. European Journal of Operational Research 82 (1995) 225-240.
- [24] DEKKER R., ROELVINK I., 1995. *MARGINAL COST CRITERIA FOR PREVENTIVE REPLACEMENT OF A GROUP OF COMPONENTS*. European journal of operational Research, n°84, pages 467- 480.
- [25] DI-MASCOLO M., 1996. *Sur l'évaluation de performances et le pilotage de systèmes de production*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [26] ENSCORE E., BURNS D., 1983 ENSCORE E., BURNS D., 1983. *DYNAMIC SCHEDULING OF A PREVENTIVE MAINTENANCE PROGRAM*. International Journal of Production Research, vol. 21, n°3, pages 357-368.
- [27] FRANCASTEL J-C., 2001. *Externalisation De La Maintenance - Stratégies - Méthodes - Contrats*. Edition DUNOD.
- [28] FRENK J. B. G., DEKKER R., KLEIJN M. J., 1995. *A NOTE ON THE MARGINAL COST APPROACH IN MAINTENANCE*. Journal of Optimization Theory and Applications.
- [29] GOSSE B., SARGIS C., SPRIMONT P-A., BENAVENT C., 2000. *Les stratégies d'externalisation : opérationnalisation et changements organisationnels*

- [30] HARRY M. S., 2004. *A COST MODEL FOR SOFTWARE MAINTENANCE & EVOLUTION*. Proceedings of the 20th IEEE International Conference on Software Maintenance (ICSM'04) 1063-6773/04, IEEE, 2004.
- [31] HEIKKILÄ J., 2003. Penser clairement l'externalisation. Rapport Technique, Les Echos.
- [32] JANSEN S., RIJSEMUS W., 2006. *BALANCING TOTAL COST OF OWNERSHIP AND COST OF MAINTENANCE WITHIN A SOFTWARE SUPPLY NETWORK*. Proceedings of the IEEE International Conference on Software Maintenance (ICSM2006, Industrial track), (2006).
- [33] JONGE M., MONAJEMI R., 2001. *COST-EFFECTIVE MAINTENANCE TOOLS FOR PROPRIETARY LANGUAGES*. Software Engineering (SEN) SEN-R0116 May 31, 2001
- [34] KAFFEL H. (2001). *La maintenance distribuée : concept, évaluation et mise en œuvre*. Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences et de Génie, Université Laval, Québec.
- [35] KATTAN B., 2004. *Synthèse structurelle d'un contrôleur basée sur le Grafset*. Thèse de doctorat, Laboratoire d'Automatique de Grenoble, Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- [36] KEIZERS J., ADAN I., VAN DER WAL J., 2001. *A QUEUEING MODEL FOR DUE DATE CONTROL IN A MULTI SERVER REPAIR SHOP*. Naval Research Logistics, Vol. 48, 2001, pp. 281-292.
- [37] KELLY. C., MOSIER C., MAHMOODI F. 1997. *IMPACT OF MAINTENANCE POLICIES ON THE PERFORMANCE OF MANUFACTURING CELLS*. International Journal of Production Research, vol. 35, n°3, pages 767-787.
- [38] KUHN H., 1999. *PERFORMANCE EVALUATION OF AUTOMATED FLOW LINE SYSTEMS WITH LIMITED REPAIR CAPACITIES*. 2nd Aegean International Conference on Analysis and Modeling of Manufacturing Systems, pages 79-88.
- [39] LAKHAL S., MARTEL A., KETTANI O., ORAL M. et MONTREUIL B., 1999. *NETWORK COMPANIES AND COMPETITIVENESS: A FRAMEWORK FOR ANALYSIS*. European Journal of Operational Research, Vol. 118, No. 2, pp. 278-294, 1999.
- [40] LEFRANÇOIS P., 1998. *Méthode de conception de systèmes*. Note de cours GSO 62911, Université Laval, Québec-Canada.
- [41] LÉGER J-B., FERRO DE BECA A., et PINTEAU J., 1999. *AN INNOVATIVE APPROCHE FOR NEW DISTRIBUTED MAINTENANCE SYSTEM : APPLICATION TO HYDRO POWER PLANTS OF THE REMAFEX PROJET*. Computer in Industry, Vol. 38, pp. 131-148.
- [42] LÖFSTEN H., 1999. *MANAGEMENT OF INDUSTRIAL MAINTENANCE - ECONOMIC EVALUATION OF MAINTENANCE POLICIES*. International Journal of Operations & Production Management, Vol. 19, No. 7, pp. 716-737.
- [43] LOUNIS Z., VANIER D.J., 1998. *OPTIMIZATION OF BRIDGE MAINTENANCE MANAGEMENT USING MARKOVIAN MODELS*. Originally published in the Proceedings of the International Conference on Short and Medium Span Bridges, 1998, Calgary, Alberta, pp.1045-1053, v.2

- [44] LUCE S., PAVAN A., 1995. *Gestion de stocks en maintenance corrective = Stock control in corrective maintenance*. Revue d'automatique et de productique appliquées ISSN 0990-7009, 1995, vol. 8, no 2-3, pp. 285-290.
- [45] MOALLA M., PULOU J. et SIFAKIS J., 1978. *Réseaux de Petri synchronisés*. Revue RAIRO, Volume 12, N 2.
- [46] MOLLOY M.K., 1981. *On the integration of delay and throughput measures in processing models*. Thèse de doctorat, university of California, Los Angeles, USA.
- [47] MONCHY F. 2000. *Maintenance : Méthodes et Organisations*. Edition DUNOD.
- [48] NAKTIN S., 1980. *Les réseaux de Petri Stochastiques*. Thèse de Doctorat, CNAM, Paris, France.
- [49] 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.
- [50] PRINCIPE R., JACQUEMYNS Y., *LA GESTION DE LA FONCTION MAINTENANCE*.
- [51] RAUSAND M., REINERTSEN R., 1997. *FAILURE MECHANISMS AND LIFE MODELS*. International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering, Vol. 3, No. 2, pp. 13-23.
- [52] RILEY J.B., 2001. *AN OUTSOURCING APPROACH TO PERSONNEL, CAPITAL EQUIPMENT, AND INVENTORY MANAGEMENT FOR PERFUSION SERVICES IN CARDIOVASCULAR SURGERY PROGRAMS*. Hospital Materiel Management Quarterly, Rockville, Vol. 22, Iss. 3, pp. 17-24.
- [53] RIVOIRE M., FERRIER J-L., 2001. *Matlab, Simulink, Statflow : avec des exercices d'automatique résolus*. Livre, edition Technip, Paris, 2001.
- [54] RUSTENBURG J., 2000. *A system approach to budget-constrained spare parts management*. Thèse de doctorat, Eindhoven University of Technology, Pays Bas.
- [55] SASSINE Ch., SIMEU-ABAZI Z., 1998. *Intégration des politiques de maintenance dans les systèmes de production manufacturiers*. Thèse de Doctorat, INPG, Grenoble, France.
- [56] SMITH B., 2000. *OUTSOURCING ON A GRAND SCALE*. Health Management Technology, Atlanta, Vol. 21, Iss. 7, pp. 18-21.
- [57] SIMEU-ABAZI Z., 1998. *Sur la sûreté de fonctionnement des systèmes de production*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [58] SIMEU-ABAZI Z., 2007. *Maintenance centralisée pour les systèmes de production multi-sites*, RFGI, revue française de gestion industrielle, vol. n°26.
- [59] SIMEU-ABAZI Z., 2000. *Optimisation de la maintenance préventive dans les systèmes de production*. Colloque National de Sûreté de fonctionnement λμ12, Montpellier, pages 395-400.

- [60] SIMEU-ABAZI Z., ALALI ALHOUIJ A.. 2001. *Optimization of distributed maintenance: Modeling and application to the multi-factory production*, à paraître dans “Reliability Engineering & System Safety” –RESS-.
- [61] SIMEU-ABAZI Z., IUNG B., LEGER J.B., LY F. 2000. *MAINTENANCE IN THE MANUFACTURING SYSTEMS*. International Conference MCPL'2000, Grenoble, pages 831-836.
- [62] SIMEU-ABAZI Z., SASSINE C. 2001. *Maintenance Integration In Manufacturing Systems Evaluation And Decision*. International Journal of manufacturing systems IJMS, Vol.13, N° 3.
- [63] TIANHAI Z., YONG Q.i, JUNYI S., DI H., XIAOMEI Z., 2006, *The Optimal Rejuvenation Schedule Driven by Maintenance Cost in Application Server*. Volume 3, No.8 (Serial No.21) Journal of Communication and Computer, ISSN1548-7709, USA.
- [64] VERNADAT F., 1999. *Technique de modélisation en entreprise : Application aux Processus Opérationnels*. Economica, Paris.
- [65] ZEMOURI R., RACOCEANU D., ZERHOUNI N., DURAND S., 2003. *Une approche hybride pour l'évaluation et l'amélioration des performances d'un service de maintenance, basée sur les modèles analytiques et la simulation*.
- [66] ZWINGELSTEIN G., 1995. Livre *Diagnostic Des Défaillances - Théorie Et Pratique Pour Les Systèmes Industriels*. Livre.
- [67] ZWINGELSTEIN G., 1996. *La Maintenance Basée sur la fiabilité - Guide Pratique D'application de la RCM*. Livre.

8 Annexes :

8.1 Annexe A. Les modèles simulation :

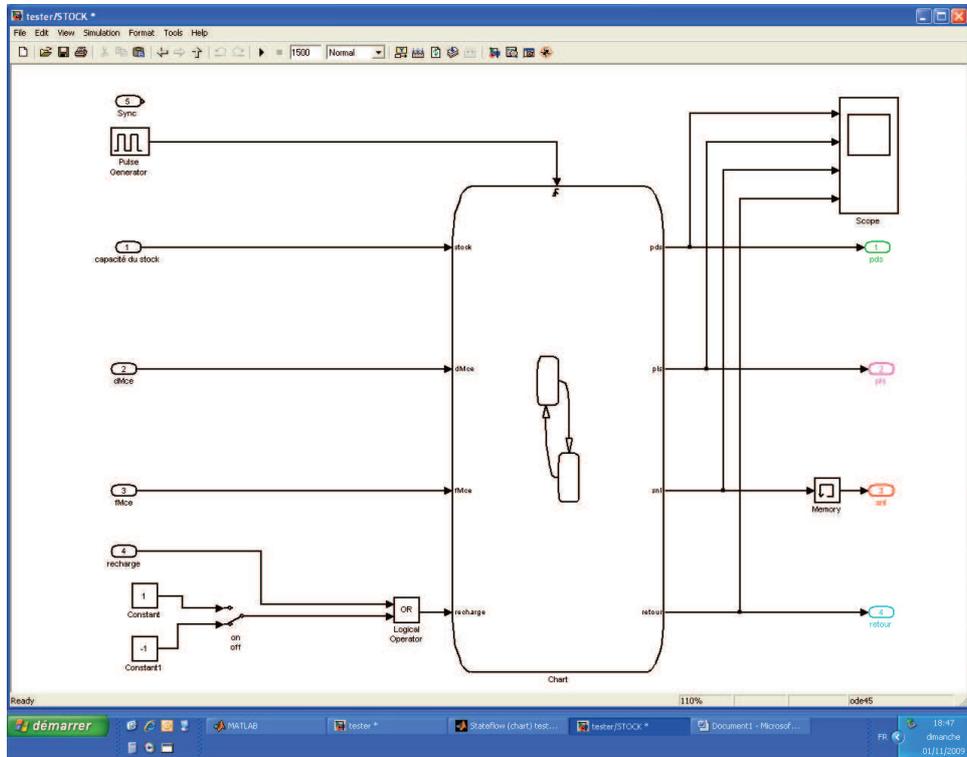


Figure A.1 Modèle Simulation boîte, Stock

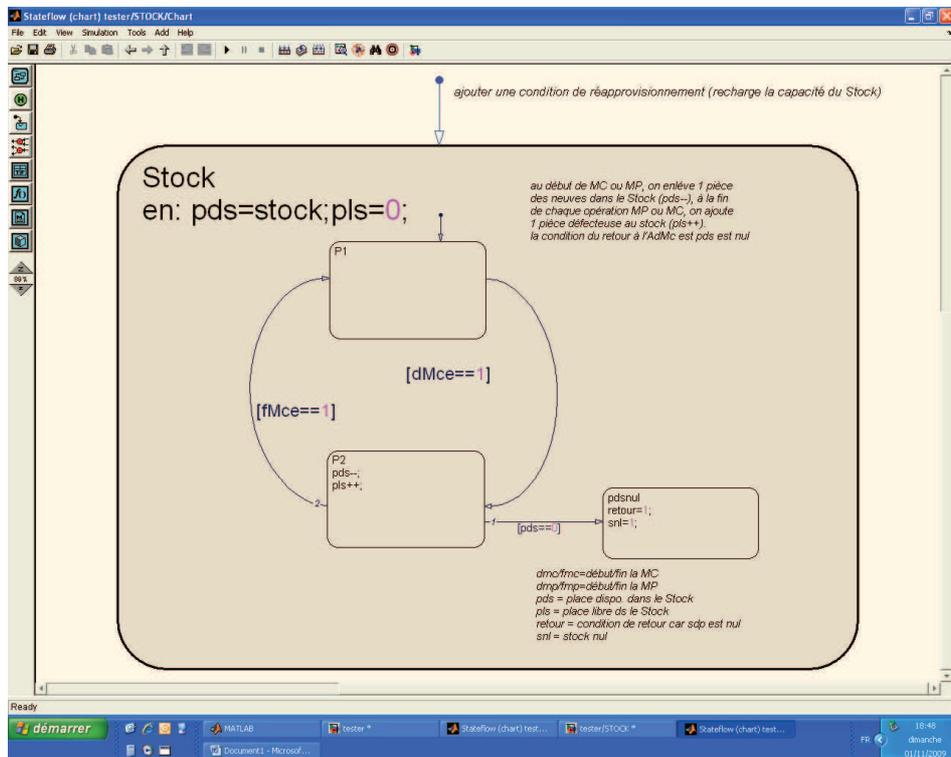


Figure A.2 Modèle Simulation graphe, Stock

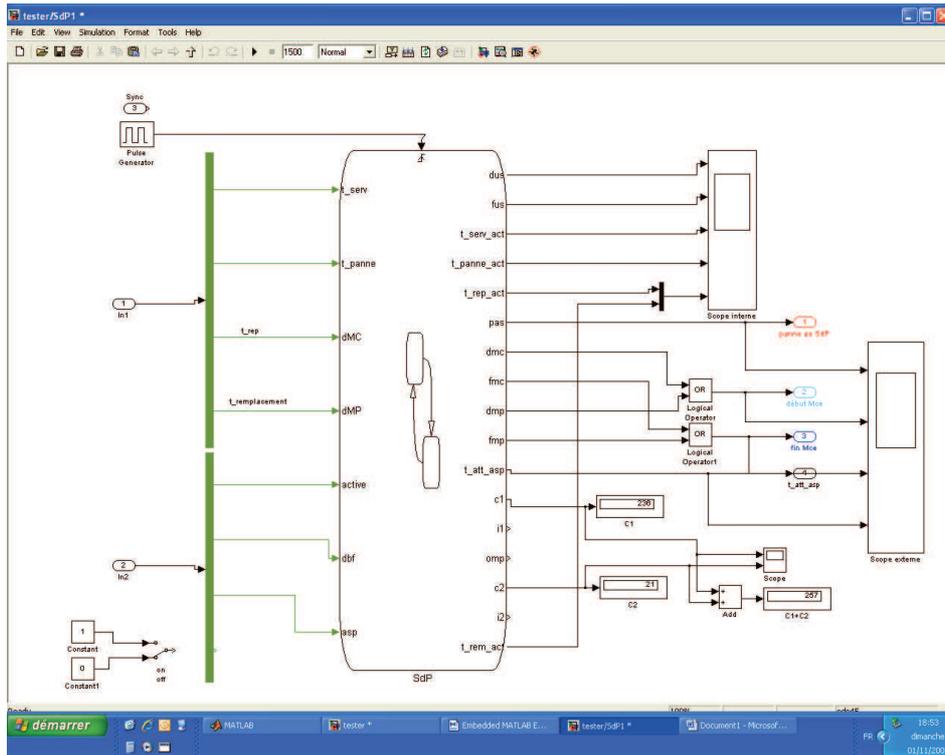


Figure A.5 Modèle Simulation Boîte, SdP

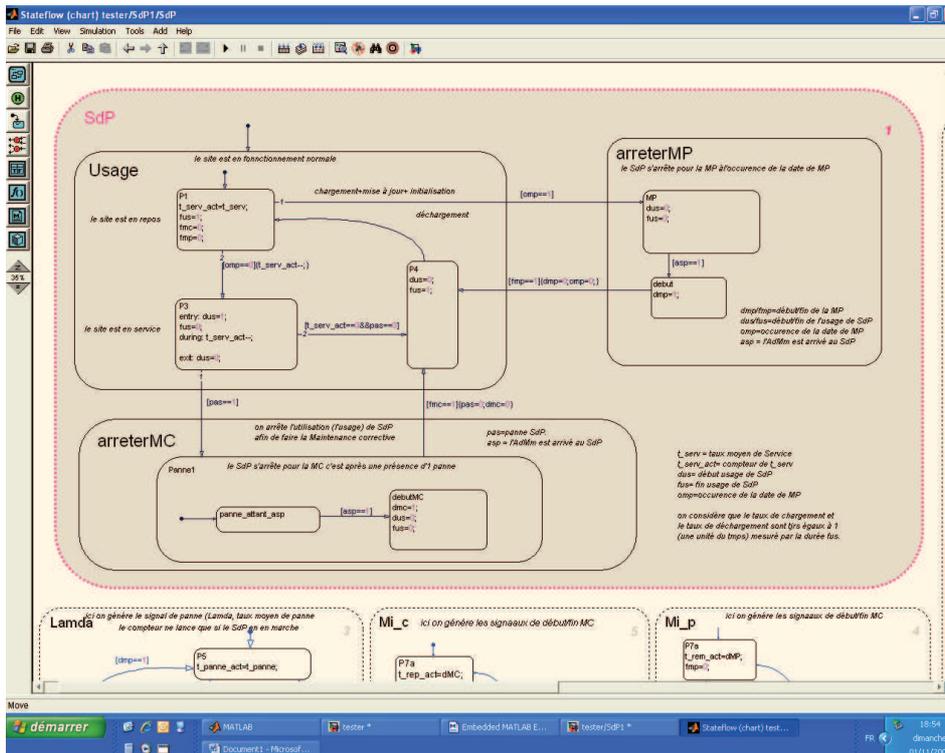


Figure A.6 Modèle Simulation graphe, SdP

Annexe A. Les modèles simulation :

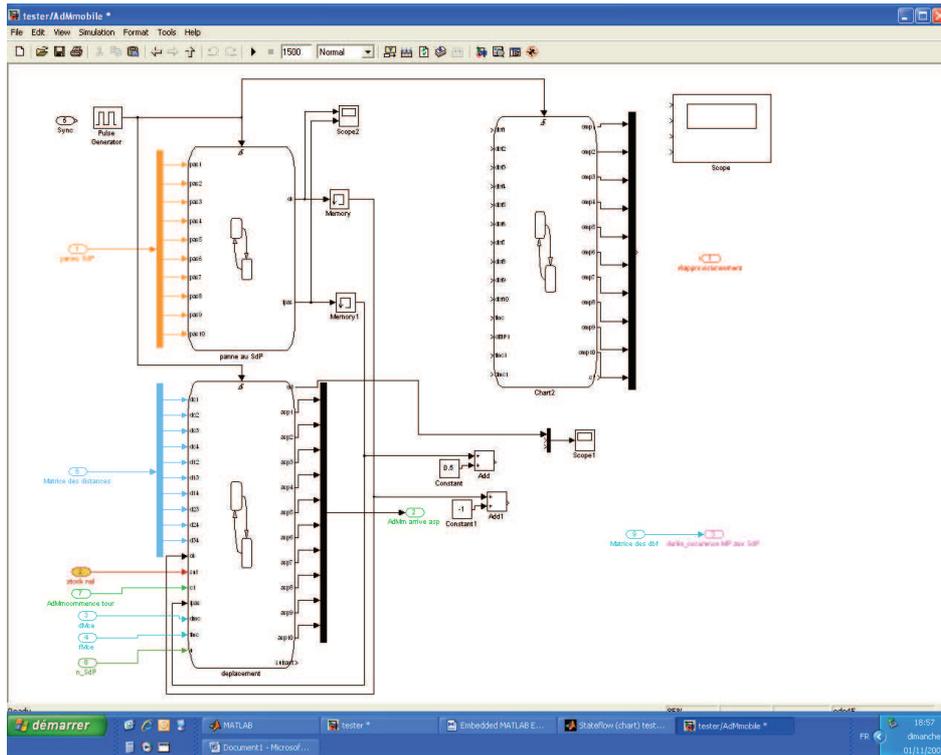


Figure A.7 Modèle Simulation Boite, AdMm

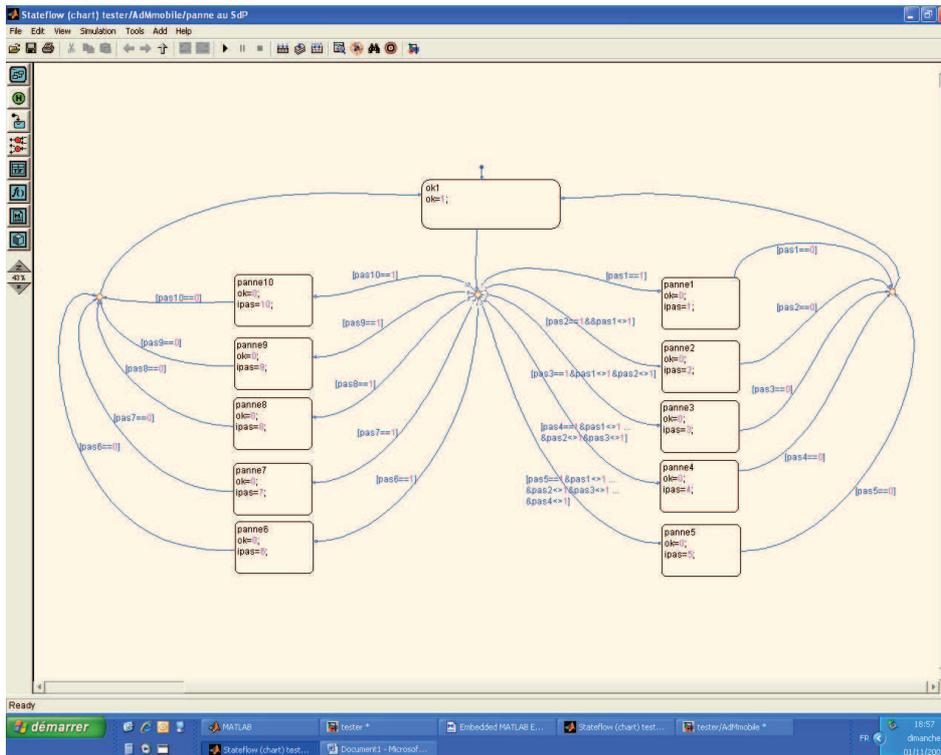


Figure A.8 Modèle Simulation Graphe, AdMm

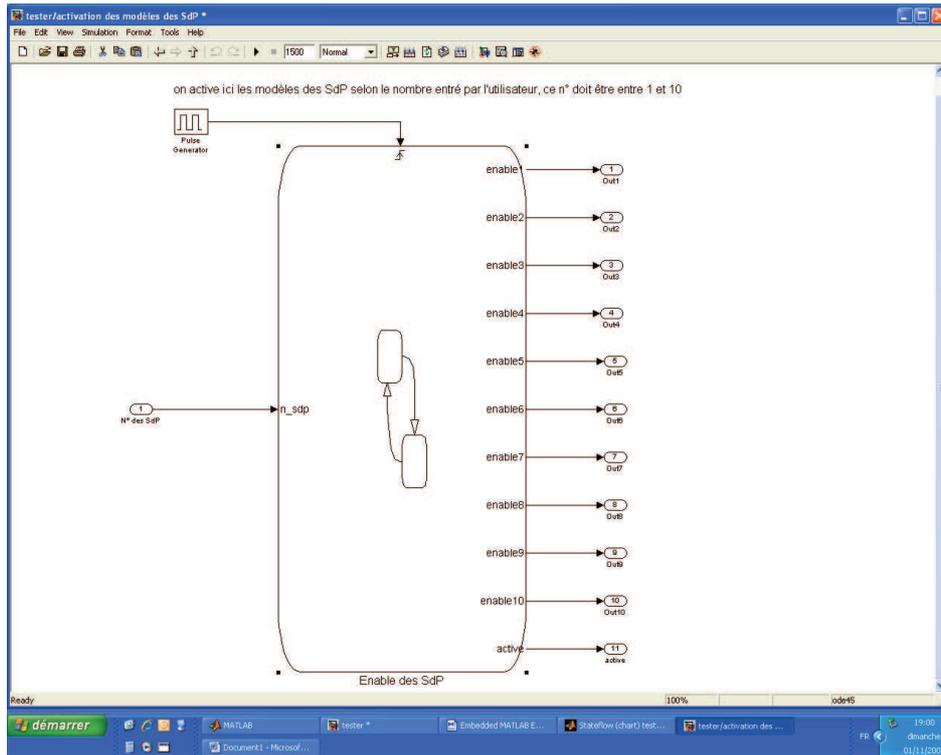


Figure A.9 Modèle Simulation Boîte, Contrôle

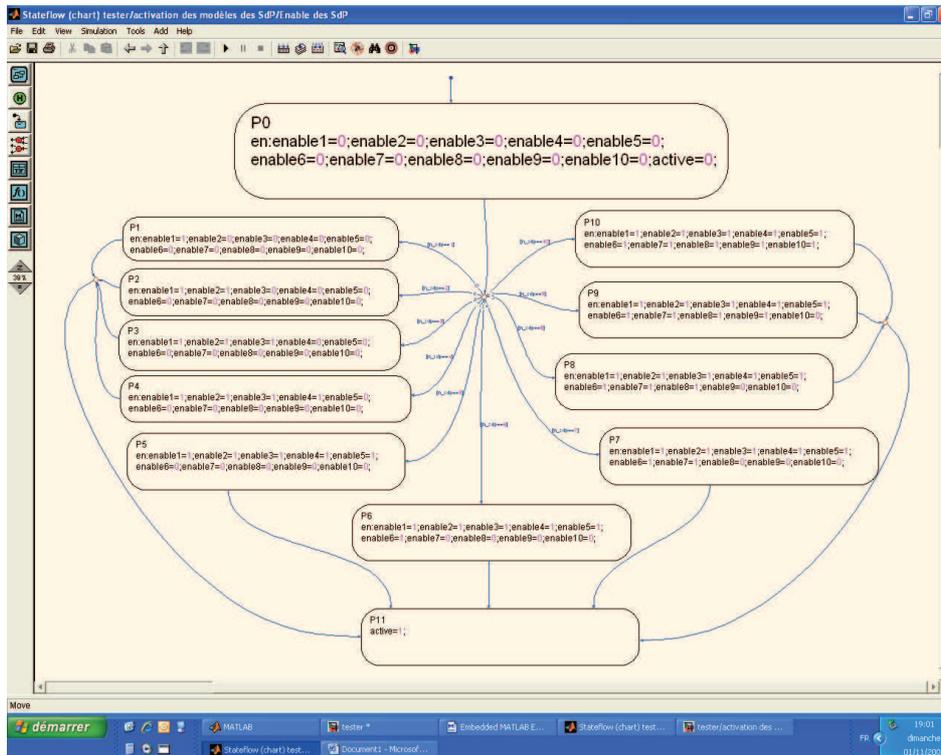


Figure A.10 Modèle Simulation Graphe, Contrôle

Annexe A. Les modèles simulation :

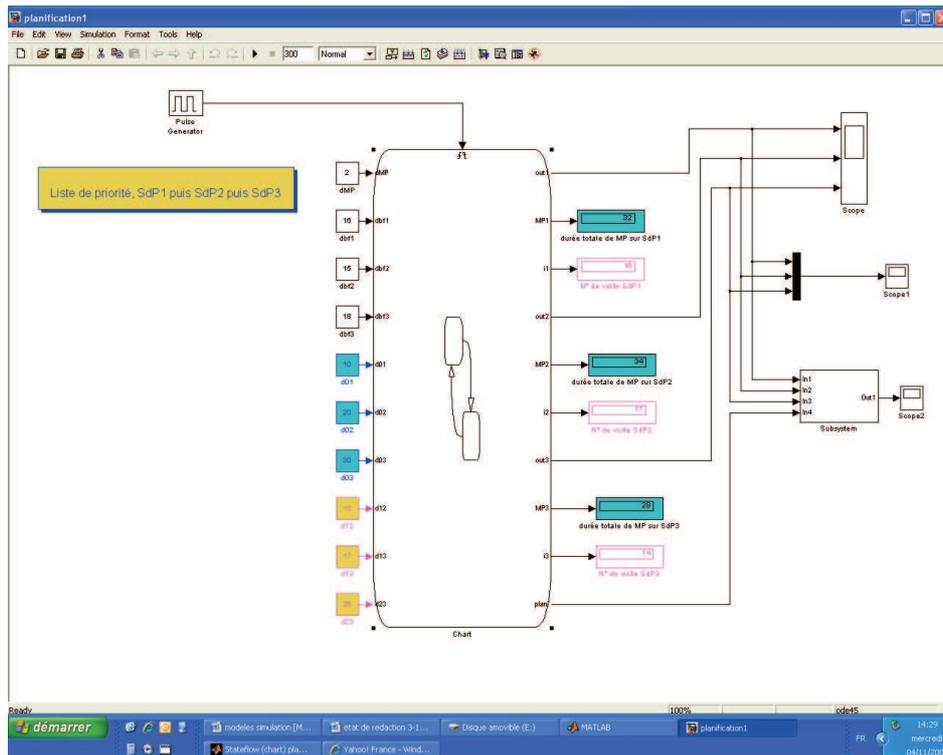


Figure A.11 Modèle Simulation Boîte, Planification

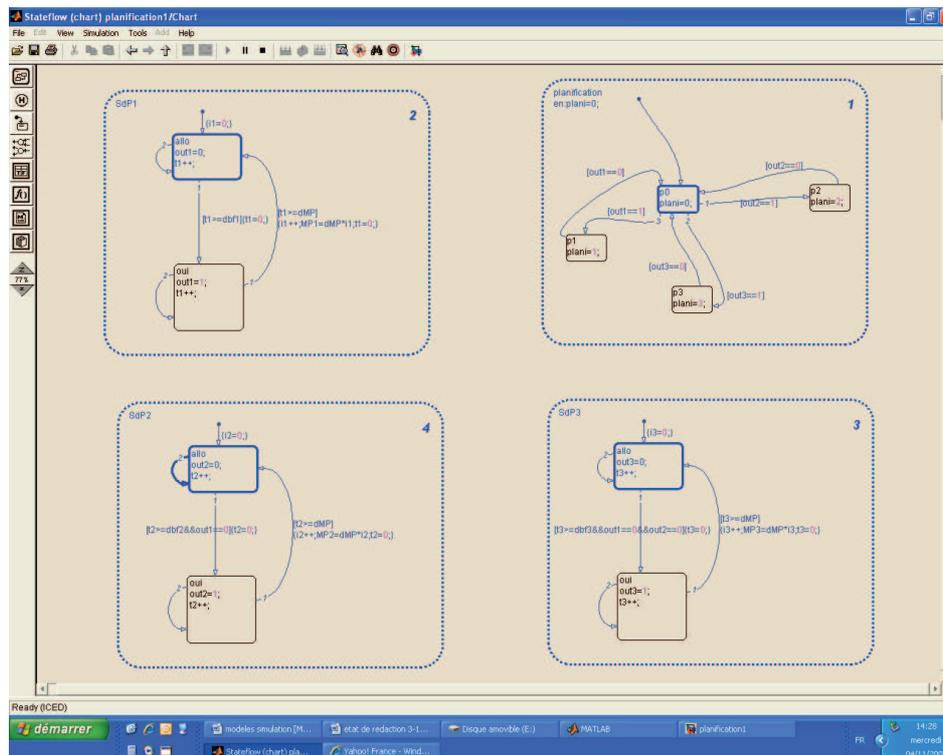


Figure A.12 Modèle Simulation Graphe, Planification

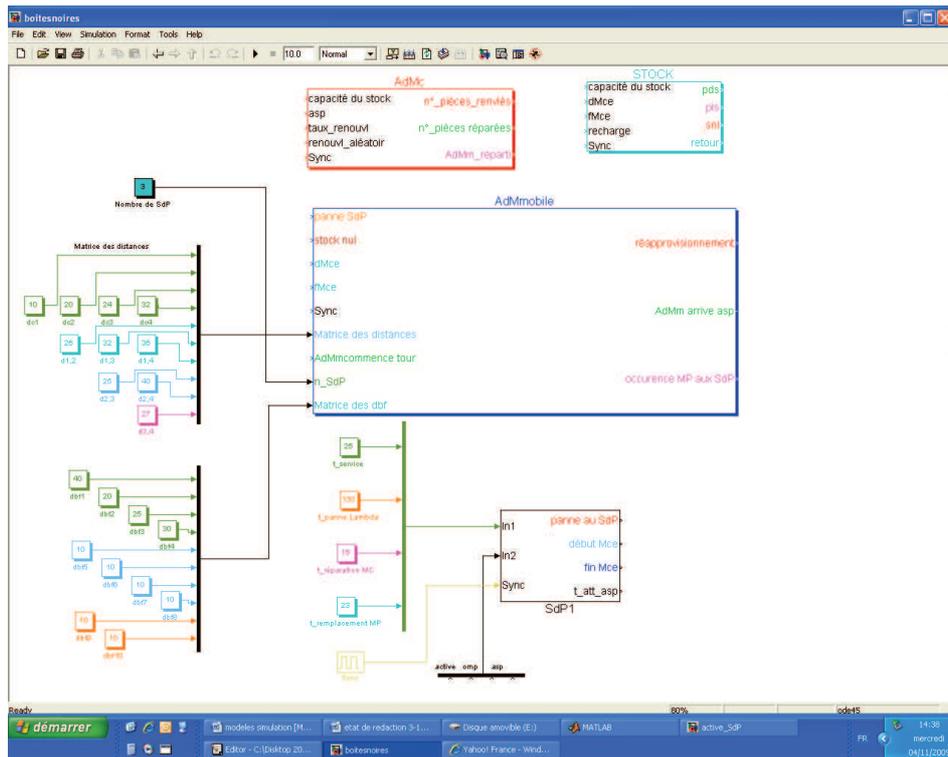


Figure A.13 Modèle Simulation Boite, Boites Noires

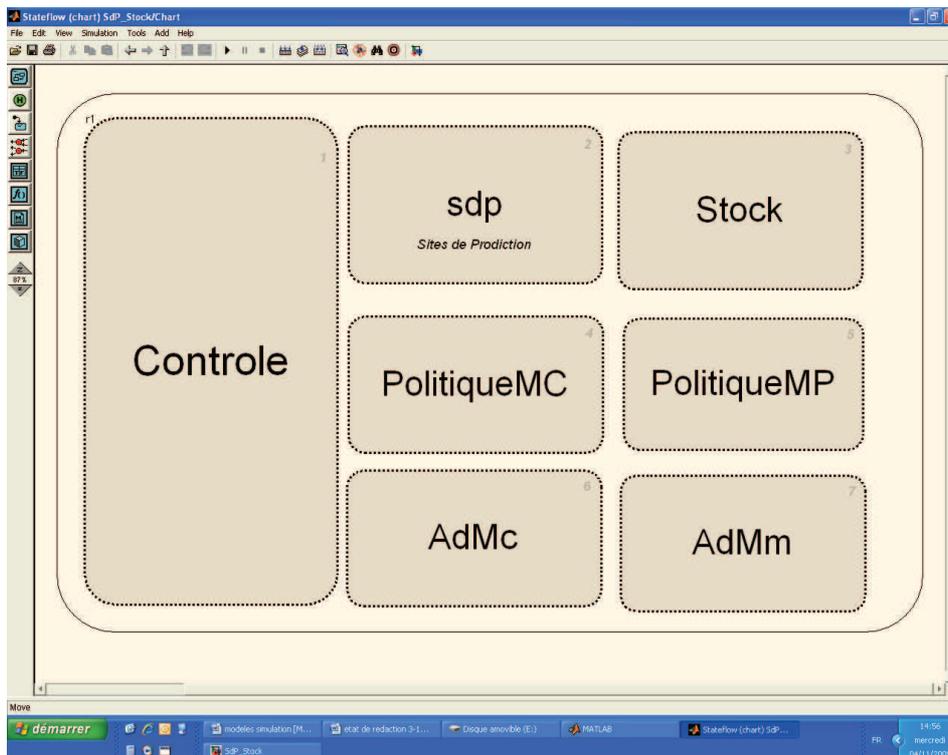


Figure A.14 Modèle Simulation Graphe, Boites Noires

Annexe A. Les modèles simulation :

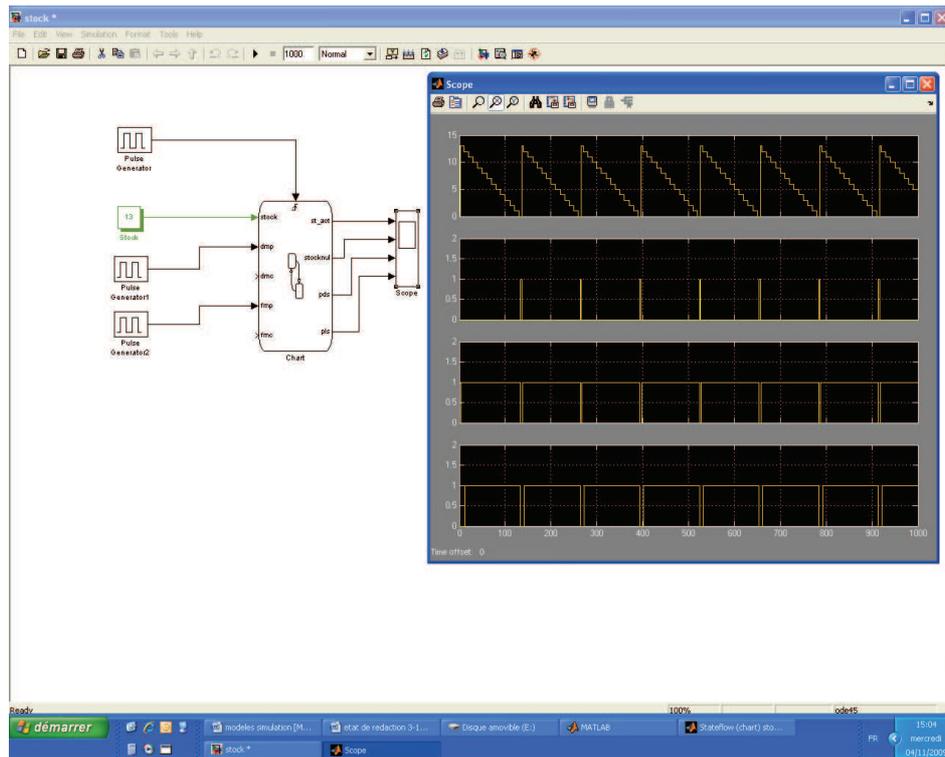


Figure A.15 Modèle Simulation, évolution du Stock

8.2 Annexe B. équitations des parcours, cas de 4 sites de production

Cas 1 :	$C \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow C$	$C_R = (d_{12} + d_{23} + d_{34} + d_{14}) x + (d_{c1} + d_{c4})$
Cas 2 :	$C \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow C$	$C_R = (d_{12} + d_{24} + d_{34} + d_{13}) x + (d_{c1} + d_{c3})$
Cas 3 :	$C \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow C$	$C_R = (d_{13} + d_{23} + d_{24} + d_{14}) x + (d_{c1} + d_{c4})$
Cas 4 :	$C \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow C$	$C_R = (d_{13} + d_{34} + d_{24} + d_{12}) x + (d_{c1} + d_{c2})$
Cas 5 :	$C \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow C$	$C_R = (d_{14} + d_{24} + d_{23} + d_{13}) x + (d_{c1} + d_{c3})$
Cas 6 :	$C \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow C$	$C_R = (d_{14} + d_{34} + d_{23} + d_{12}) x + (d_{c1} + d_{c2})$
Cas 7 :	$C \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow C$	$C_R = (d_{12} + d_{13} + d_{34} + d_{24}) x + (d_{c2} + d_{c4})$
Cas 8 :	$C \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow C$	$C_R = (d_{12} + d_{14} + d_{34} + d_{23}) x + (d_{c2} + d_{c3})$
Cas 9 :	$C \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow C$	$C_R = (d_{23} + d_{13} + d_{14} + d_{24}) x + (d_{c2} + d_{c4})$
Cas 10 :	$C \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1 \rightarrow C$	$C_R = (d_{23} + d_{34} + d_{14} + d_{12}) x + (d_{c2} + d_{c1})$
Cas 11 :	$C \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow C$	$C_R = (d_{24} + d_{14} + d_{13} + d_{23}) x + (d_{c2} + d_{c3})$
Cas 12 :	$C \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow C$	$C_R = (d_{24} + d_{34} + d_{13} + d_{12}) x + (d_{c2} + d_{c1})$
Cas 13 :	$C \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow C$	$C_R = (d_{13} + d_{12} + d_{24} + d_{34}) x + (d_{c3} + d_{c4})$
Cas 14 :	$C \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow C$	$C_R = (d_{13} + d_{14} + d_{24} + d_{23}) x + (d_{c3} + d_{c2})$
Cas 15 :	$C \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 4 \rightarrow C$	$C_R = (d_{23} + d_{12} + d_{14} + d_{34}) x + (d_{c3} + d_{c4})$
Cas 16 :	$C \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 1 \rightarrow C$	$C_R = (d_{23} + d_{24} + d_{14} + d_{13}) x + (d_{c3} + d_{c1})$
Cas 17 :	$C \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow C$	$C_R = (d_{34} + d_{14} + d_{12} + d_{23}) x + (d_{c3} + d_{c2})$
Cas 18 :	$C \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1 \rightarrow 1 \rightarrow C$	$C_R = (d_{34} + d_{24} + d_{12} + d_{13}) x + (d_{c3} + d_{c1})$
Cas 19 :	$C \rightarrow 4 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow C$	$C_R = (d_{14} + d_{12} + d_{23} + d_{34}) x + (d_{c3} + d_{c4})$
Cas 20 :	$C \rightarrow 4 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow C$	$C_R = (d_{14} + d_{13} + d_{23} + d_{24}) x + (d_{c2} + d_{c4})$
Cas 21 :	$C \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow C$	$C_R = (d_{24} + d_{12} + d_{13} + d_{34}) x + (d_{c3} + d_{c4})$
Cas 22 :	$C \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow C$	$C_R = (d_{24} + d_{23} + d_{13} + d_{14}) x + (d_{c1} + d_{c4})$
Cas 23 :	$C \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow C$	$C_R = (d_{34} + d_{13} + d_{12} + d_{24}) x + (d_{c2} + d_{c4})$
Cas 24 :	$C \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow C$	$C_R = (d_{34} + d_{23} + d_{12} + d_{14}) x + (d_{c1} + d_{c4})$

8.3 Annexe C. L'outil de simulation : STATEFLOW/MATLAB,

Vérification par simulation

La simulation permet de faire la vérification comportementale et l'analyse de sensibilité des paramètres. La vérification comportementale permet de s'assurer que l'ordonnancement du système est robuste alors que la phase d'analyse permet d'étayer les valeurs de décalages des dates de début de la maintenance préventive pour cause d'aléas. L'un des avantages du modèle à réseau de Petri est que le même modèle est utilisé. Nous ne décrivons pas de programme de simulation, mais nous allons préciser quelques points qui nous semblent importants pour bien situer la simulation dans le cadre de ce modèle.

Stateflow

Stateflow est une conception graphique et un outil de développement pour simuler les systèmes réactifs complexes.

Stateflow est un environnement convenable pour modéliser la logique d'évolution d'un système afin de contrôler et surveiller un système physique modélisé sous Simulink.

Grâce à son environnement graphique, Stateflow permet de superviser tout système à évolution.

Dans Stateflow, un état (state) décrit un mode de fonctionnement d'un système à événement discret. L'activité ou l'inactivité des états est basé sur les événements et les conditions. Une transition est un objet graphique qui relie un état à un autre; de la source où la transition commence à la destination où la transition termine. Une étiquette de transition décrit les conditions ou événement permettant de faire évoluer le système.

Dans Stateflow un état est défini par l'étiquette d'état (State Labels) comprenant :

- name
- entry:entry actions
- during:during actions
- exit:exit actions
- bind:events, data
- on event_name:on event_name actions

et l'étiquette de Transition (Transition Label) comprend:

- event[condition]{condition_action}/transition_action

La validation des transitions est réalisée si l'état courant est actif et l'étiquette de transition est valide. La figure A.16 présente les différents éléments permettant la construction d'un modèle Stateflow.

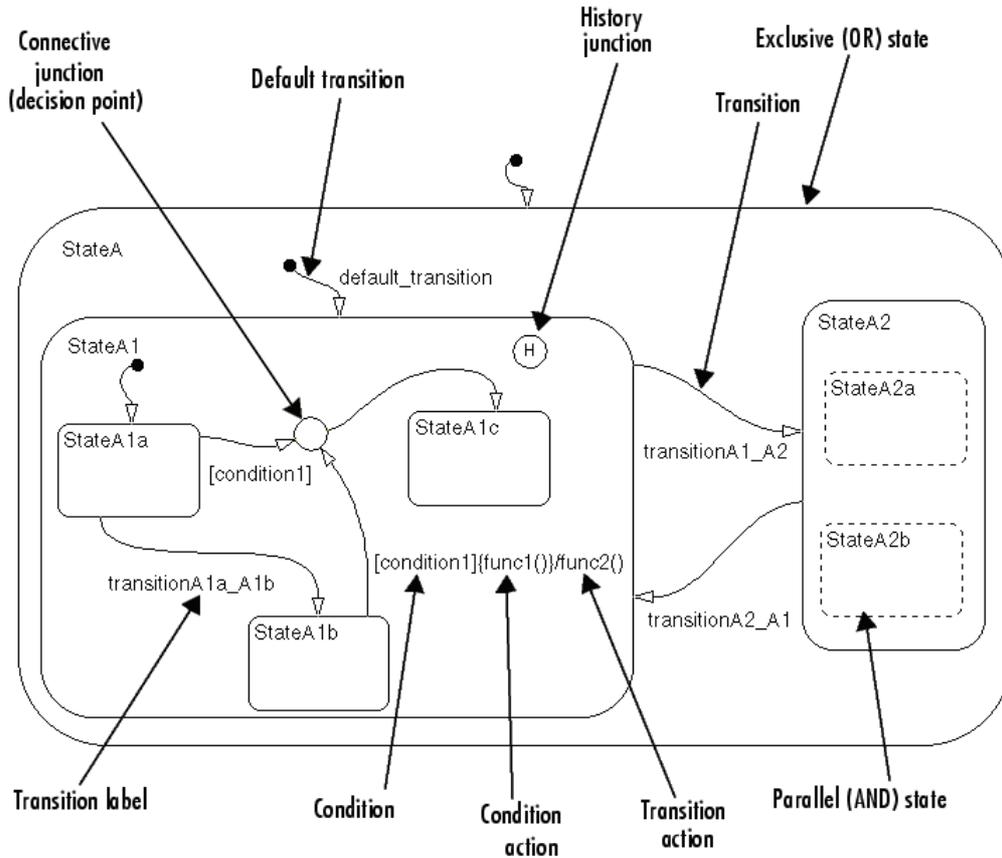


Figure A.16 Eléments de base de Stateflow

8.4 Annexe D. Résultats d'influence d'emplacement de l'AdMc pour un exemple de système de trios sites de production

C'est un exemple d'un système contenant trois sites de production.

$$n = 3$$

La matrice des distances est la suivante :

$$MD_P = C \begin{bmatrix} 0 & d_{c1} & d_{c2} & d_{c3} \\ 1 & d_{c1} & 0 & d_{12} & d_{13} \\ 2 & d_{c2} & d_{12} & 0 & d_{23} \\ 3 & d_{c3} & d_{13} & d_{23} & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 10 & 20 & 24 \\ 10 & 0 & 26 & 32 \\ 20 & 26 & 0 & 25 \\ 24 & 32 & 25 & 0 \end{bmatrix}$$

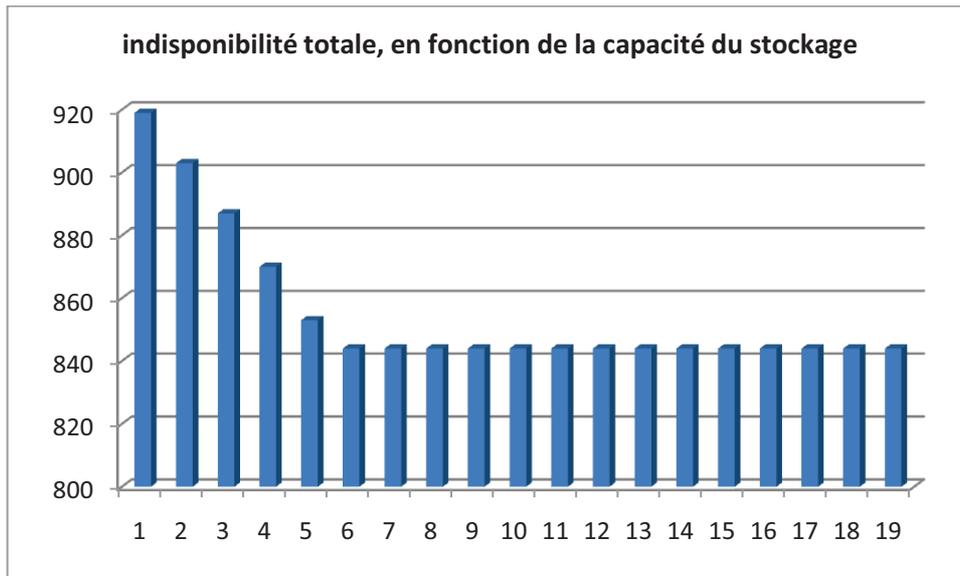
Avec ces données :

Taux de service	1/5	MUT
Taux de réparation	1/5	MDT
Taux de remplacement	1/5	dMP
Taux de panne	1/1500	MTTF
Durée de bon fonctionnement	128	périodicité de MP
Taux de chargement/ déchargement	1/6	

On a obtenu les résultats suivants d'après la simulation :

	SdP	Capacité du stock en lot (lot = nombre des SdP)																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
t_attente	SdP1	r1	115	108	102	96	95	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92
		r2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	SdP2	r1	145	140	137	134	122	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
		r2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	SdP3	r1	164	160	153	145	141	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137
		r2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Number de cycles effectués (X)		33	16	11	8	6	5	4	4	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	
t_attente totale, Indisponibilité, cas de MD		424	408	392	375	358	349	349	349	349	349	349	349	349	349	349	349	349	349	
temps de faire la Mce	SdP1	r1	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	
		r2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	SdP2	r1	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	
		r2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	SdP3	r1	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	
		r2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Indisponibilité totale causé par les actions de		495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495		
Indisponibilité totale, MD		919	903	887	870	853	844	844	844	844	844	844	844	844	844	844	844	844		

On remarque qu'à partir d'une capacité du stockage égale à 6, l'indisponibilité de l'ensemble des sites de production ne serait plus diminuée en fonction de la capacité du stock. L'augmentation de cette capacité ne sera plus le facteur important qui joue le rôle principal d'amélioration de la disponibilité du système. La figure suivante montre ce cas de figure.



Concernant le coût d'attente, on a obtenu d'après la simulation les résultats suivants:

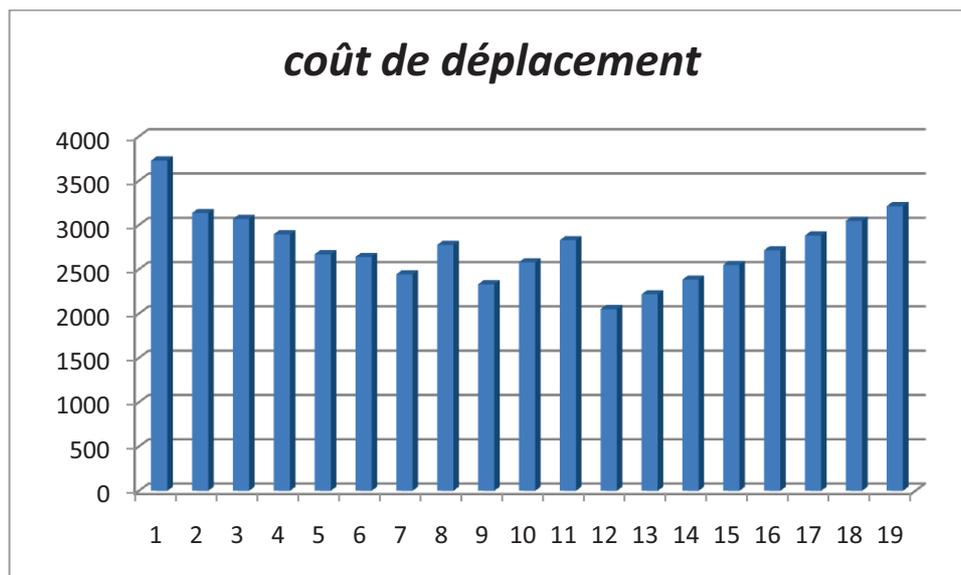
calcul le coût d'attente = temps d'attente x un coefficient de coût d'attente																					
coefficient coût d'attente	SdP1	r1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
		r2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	SdP2	r1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		r2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	SdP3	r1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		r2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
coût d'attente	SdP1	r1	115	108	102	96	95	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	92	
		r2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	SdP2	r1	145	140	137	134	122	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
		r2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	SdP3	r1	164	160	153	145	141	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137	137
		r2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
coût d'attente MP (total)			919	903	887	870	853	844	844	844	844	844	844	844	844	844	844	844	844	844	
coût d'attente MC (total)			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
coût total d'attente			919	903	887	870	853	844													

Par contre, pour le coût de déplacement, la simulation donne les résultats ci-dessous :

calcul le coût de déplacement = coût d'un cycle (CR) x nombre de cycles effectuées (X)																				
b2=(dc1+dc2)	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
a =a1=a2=a3=(d12+d13+d23)	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83
coefficient coût déplacement	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
coût de déplacement (routage 1cycle)= a . (coefficient c_dép) . x+b		113	196	279	362	445	528	611	694	777	860	943	1026	1109	1192	1275	1358	1441	1524	1607
coût Totale déplacement (routage) = coût de cycle x n° des cycles effectuée		3729	3136	3069	2896	2670	2640	2444	2776	2331	2580	2829	2052	2218	2384	2550	2716	2882	3048	3214

Ces résultats sont représentés par la figure suivante :

Annexe D. Résultats d'influence d'emplacement de l'AdMc pour un exemple de système de trios sites de production



Sur cette figure on peut remarquer que pour une capacité de stockage égale à 12, on a un coût de déplacement optimal (minimum).

On liste les autres coûts pour faire la comparaison entre les deux cas, l'état du système étudié avant l'intégration de la maintenance distribuée et après l'intégration de la politique de maintenance distribuée. On obtient les résultats suivants :

- Pour calculer le coût de maintenance distribuée :

coût d'acquisition d'une pièce	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
coût d'acquisition d'un lot	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
coût total d'acquisition des pièces		3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57
coût stockage d'une pièce	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
coût stockage d'un lot	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
coût total de stockage		3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	51	54	57
coût des ressources_1	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100
coût des ressources_2	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
calculer le coût de MD = coût total d'attente + coût Totale déplacement (routage) + coût total d'acquisition des pièces + coût																				
coût total de M.D.		7754	7151	7074	6890	6653	6620	6430	6768	6329	6584	6839	6068	6240	6412	6584	6756	6928	7100	7272

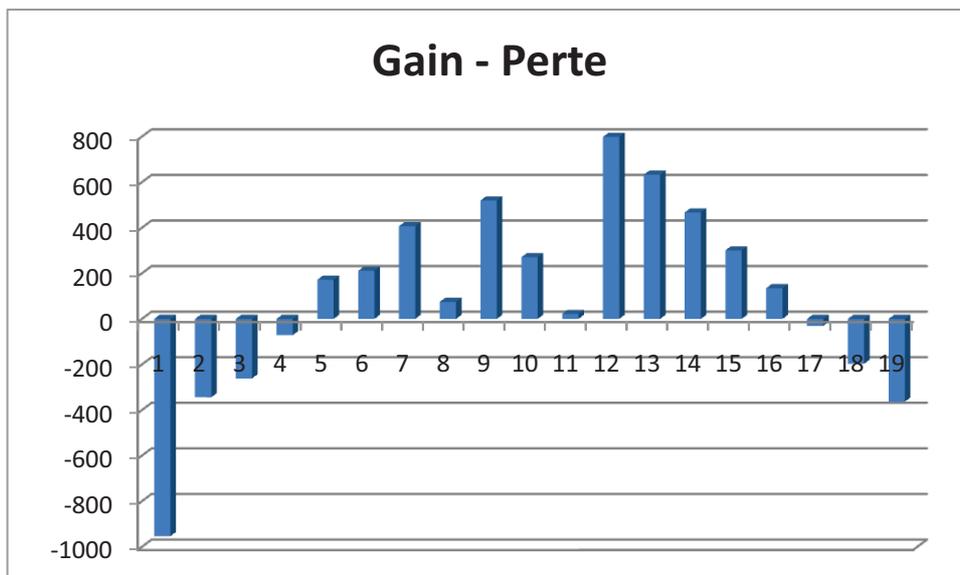
- Pour calculer le coût de maintenance en cas classique (avant l'intégration de la maintenance distribuée) :

temps d'arrêt sur les SdP = dMP x Nombre d'activité de mce effectuées (X . x) =																					
		165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	
coefficient coût d'attente	SdP1	r1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
		r2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	SdP2	r1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
		r2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	SdP3	r1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
		r2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
coût d'arrêt, sans MD	SdP1	r1	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	
		r2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	SdP2	r1	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	
		r2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	SdP3	r1	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	
		r2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
coût d'arrêt MP (total)			495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495		
coût d'arrêt MC (total)			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
coût total d'arrêt			495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495		
coût des ressources Sans MD		6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300		
coût total de Mce sans MD (attente=0)			6801	6807	6813	6819	6825	6831	6837	6843	6849	6855	6861	6867	6873	6879	6885	6891	6897	6903	6909

On fait la comparaison pour les deux cas précédents :

la difference		-953	-344	-261	-71	172	211	407	75	520	271	22	799	633	467	301	135	-31	-197	-363
Comparaison avec et sans MD		xxx	xxx	xxx	xxx	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	xxx	xxx	xxx

La figure suivante montre la différence entre ces deux derniers coûts :



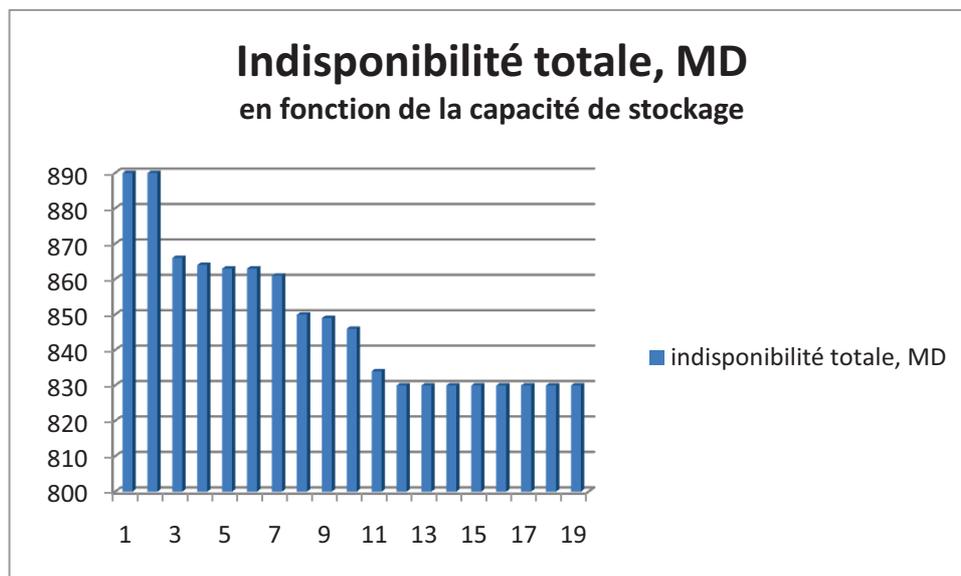
On voit bien que, le coût d'application la maintenance distribuée est rentable à partir d'une capacité de stockage égale à 5. La meilleure rentabilité est obtenue pour une capacité de stockage égale à 12.

Annexe D. Résultats d'influence d'emplacement de l'AdMc pour un exemple de système de trios sites de production

Pour étudier l'influence de l'emplacement de l'AdMc, on applique l'exemple donné par la Figure 5.12.

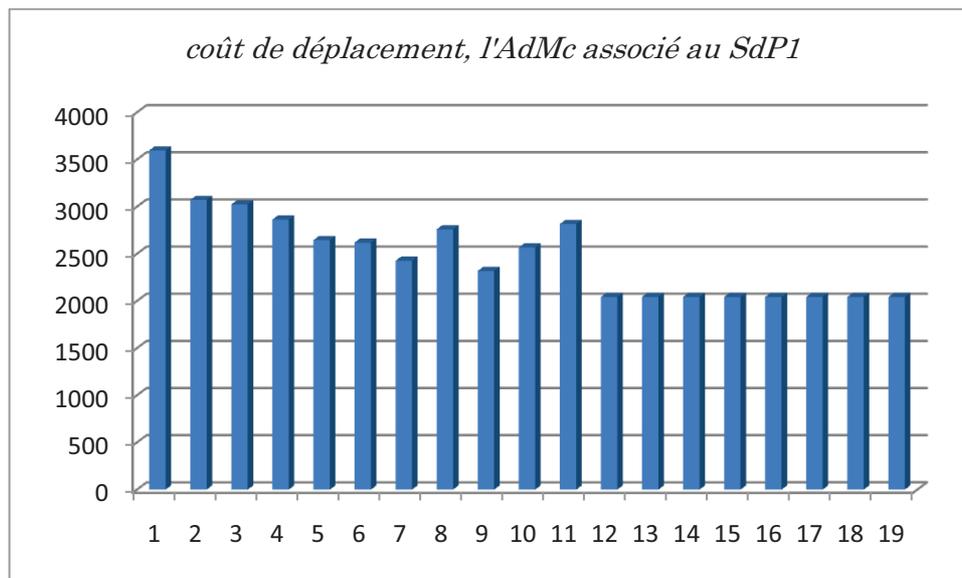
On donne les résultats pour le premier cas de figure, où l'AdMc est placé au niveau du SdP1 :

	SdP	Capacité du stock en lot (lot = nombre des SdP)																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	12	12	12	12	12	12	12	
t_attente	SdP1	r1	102	102	94	93	92	92	90	88	87	87	80	80	80	80	80	80	80	80	80
		r2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	SdP2	r1	140	140	133	132	132	132	127	127	125	123	120	120	120	120	120	120	120	120	120
		r2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	SdP3	r1	153	153	144	144	144	144	140	140	139	136	135	135	135	135	135	135	135	135	135
		r2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Number de cycles effectués (X)			33	16	11	8	6	5	4	4	3	3	3	2	2	2	2	2	2	2	
t_attente totale, Indisponibilité, cas de MD			395	395	371	369	368	366	355	354	351	339	335	335	335	335	335	335	335	335	335
temps de faire la Mce	SdP1	r1	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	
		r2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7
	SdP2	r1	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165
		r2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7
	SdP3	r1	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165
		r2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7
indisponibilité totale causé par les actions de			495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	
indisponibilité totale, MD			890	890	866	864	863	863	861	850	849	846	834	830	830	830	830	830	830	830	830



calcul le coût d'attente = temps d'attente x un coefficient de coût d'attente																					
coefficient coût d'attente	SdP1	r1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
		r2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	SdP2	r1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		r2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	SdP3	r1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		r2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
coût d'attente																					
coût d'attente	SdP1	r1	102	102	94	93	92	92	90	88	87	87	80	80	80	80	80	80	80	80	
		r2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	SdP2	r1	140	140	133	132	132	132	127	127	125	123	120	120	120	120	120	120	120	120	120
		r2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	SdP3	r1	153	153	144	144	144	144	140	140	139	136	135	135	135	135	135	135	135	135	135
		r2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
coût d'attente MP (total)			890	890	866	864	863	863	861	850	849	846	834	830	830	830	830	830	830	830	
coût d'attente MC (total)			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
coût total d'attente			890	890	866	864	863	863	861	850	849	846	834	830							

calcul le coût de déplacement = coût d'un cycle (CR) x nombre de cycles effectuées (X)																			
b2=(dc1+dc2)	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26	26
a =a1=a2=a3=(d12+d13+d23)	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83	83
coefficient coût déplacement	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
coût de déplacement (routage 1cycle)= a . (coefficient c_dép) . x + b		109	192	275	358	441	524	607	690	773	856	939	1022	1022	1022	1022	1022	1022	1022
coût Totale déplacement (routage) =coût de cycle x n° des cycles effectuée		3597	3072	3025	2864	2646	2620	2428	2760	2319	2568	2817	2044						

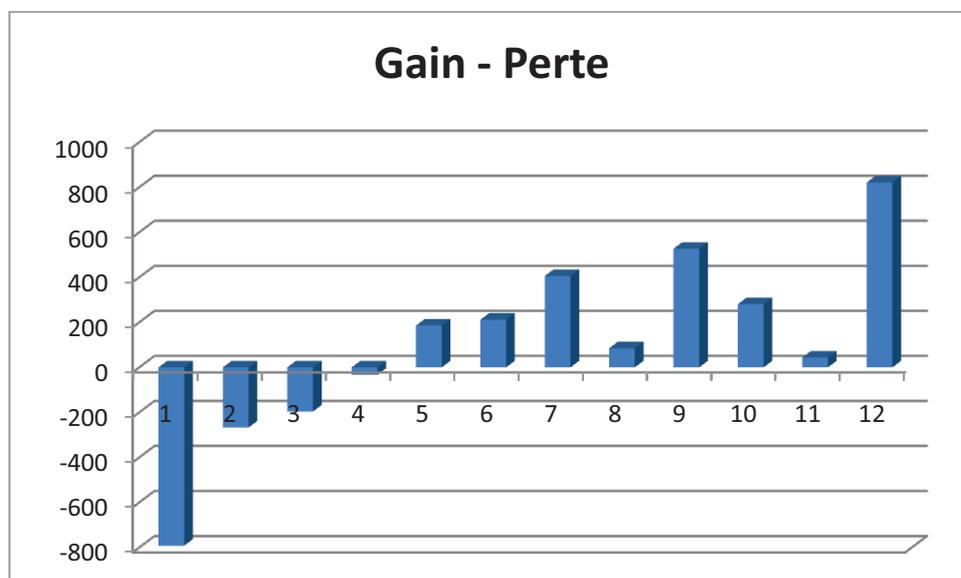


coût d'acquisition d'une pièce	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
coût d'acquisition d'un lot	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
coût total d'acquisition des pièces		3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36						
coût stockage d'une pièce	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
coût stockage d'un lot	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
coût total de stockage		3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36						
coût des ressources_1	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100	2100
coût des ressources_2	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
calcule le coût de MD = coût total d'attente + coût Totale déplacement (routage) + coût total d'acquisition des pièces + coût																			
coût total de M.D.		7593	7074	7009	6852	6639	6619	6431	6758	6322	6574	6817	6046						

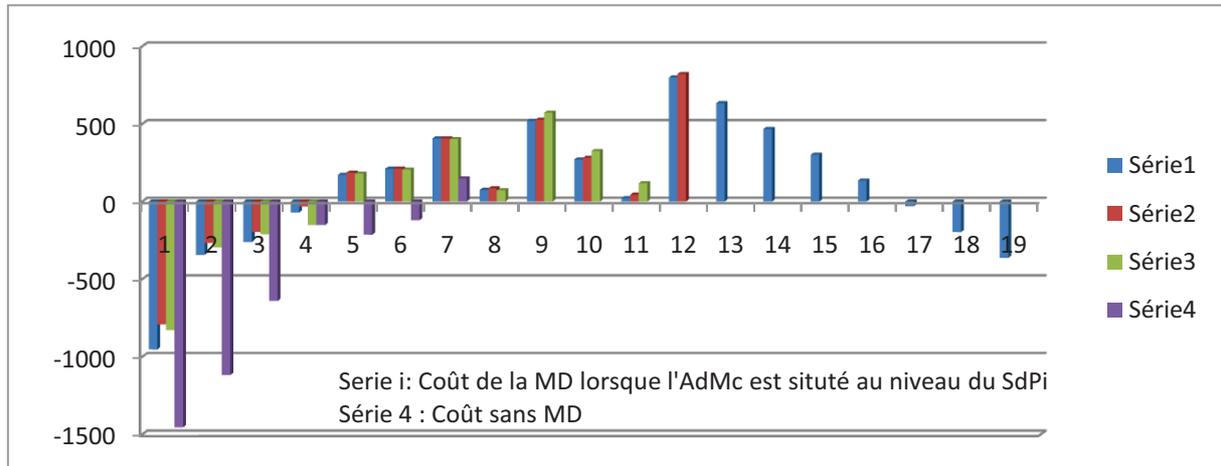
Annexe D. Résultats d'influence d'emplacement de l'AdMc pour un exemple de système de trios sites de production

temps d'arrêt sur les SdP = dMP x Nombre d'activité de mce effectuées (X . x) =																					
		165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	
coefficient coût d'attente	SdP1	r1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
		r2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	SdP2	r1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
		r2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
	SdP3	r1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
		r2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
coût d'arrêt, sans MD	SdP1	r1	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	
		r2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7
	SdP2	r1	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165
		r2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7
	SdP3	r1	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165	165
		r2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7
coût d'arrêt MP (total)			495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	
coût d'arrêt MC (total)			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	9	12	15	18	21	
coût total d'arrêt			495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	495	498	501	504	507	510	513	516	
coût des ressources Sans MD		6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300	6300	
coût total de Mce sans MD (attente=0)			6801	6807	6813	6819	6825	6831	6837	6843	6849	6855	6861	6867	6870	6873	6876	6879	6882	6885	6888

la difference		-792	-267	-196	-33	186	212	406	85	527	281	44	821	824	827	830	833	836	839	842
Comparaison avec et sans MD		xxx	xxx	xxx	xxx	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK



De la même manière, on prend les résultats pour le cas de figure où l'AdMc est situé au niveau du SdP2 et au SdP3. On présente là, la différence du coût entre le cas où il n'y a pas de maintenance distribuée et le cas où il y'en a pour voir clairement les trois cas proposés.



Cette figure a été bien présentée dans le §5.6.2.