

PLATEFORME DE MODELISATION, DE SIMULATION ET D'OPTIMISATION DES ACTIONS DE MAINTENANCE D'UN SYSTEME MULTI-COMPOSANTS

Lust Thibaut - Riane Fouad - Roux Olivier

Département de Gestion de Production et des Opérations, CREGI FUCAM
Bâtiment CRI, 151, chaussée de Binche
7000 Mons, Belgique
Tel :+32(0)65/323433 – Fax :+32(0)65/323363 – riane@fucam.ac.be

Gestion de la maintenance

MOTS-CLÉS : stratégies de maintenance, modélisation, simulation, optimisation

RÉSUMÉ : Nous abordons, dans cet article, l'élaboration des stratégies de maintenance de systèmes multi-composants. Nous développons des approches de modélisation, combinant optimisation et simulation, capables de renseigner sur le comportement dynamique et la fiabilité des systèmes à maintenir. La simulation permet d'évaluer la disponibilité du système et le coût par unité de temps des activités de maintenance et de comparer les résultats obtenus par application des différentes stratégies au système étudié. L'optimisation permet, quant à elle, de trouver les paramètres optimaux des différentes stratégies. Nous présentons l'architecture d'un outil d'aide à la décision permettant de maîtriser les coûts et la disponibilité des installations à maintenir.

KEYWORDS : maintenance strategies, modeling, simulation, optimization

ABSTRACT : In this article we deal with the development of maintenance strategies of complex multi-components systems. We develop modeling approaches that combine optimization and simulation, able to inform about the dynamic behavior and the reliability of the systems to be maintained. The use of simulation allows to evaluate the availability of the system as well as the cost per unit of time of the maintenance activities and to compare the results obtained by application of various strategies to the system under consideration. The integration of optimization techniques makes it possible to find the optimal parameters of the various strategies. We present the architecture of a decision-making tool that control the costs and the availability of the installation to be maintained.

1. Introduction

Par la prise de conscience croissante des industriels, la maintenance est passée progressivement du statut d'un mal nécessaire à celui d'une source de productivité. La maintenance est en effet un centre de production de la disponibilité. Si elle est bien gérée, elle permet d'améliorer la fiabilité de l'outil de production et donc d'augmenter sa disponibilité et sa capacité de production.

Nous nous intéressons dans le cadre de cet article au développement d'approches de modélisation des stratégies de maintenance de systèmes multi-composants. Ces approches combinent simulation et optimisation et sont capables de renseigner sur le comportement dynamique et la fiabilité des systèmes à maintenir.

La littérature scientifique est riche en travaux traitant les politiques de maintenance (M. Marseguerra et E. Zio [MARS00], J.J. McCall [MCCA65], H. Wang [WANG02]). Ces travaux considèrent généralement des systèmes mono-composants ou des architectures séries ou parallèles. Les systèmes complexes hybrides sont peu étudiés dans la littérature. Le calcul fiabiliste de ce genre de systèmes se heurte à la complexité analytique liée à la manipulation, quand elles existent, de fonctions mathématiques caractérisant la fiabilité de chacun de ses composants.

Dans la réalité, on dispose des caractéristiques de fiabilité des composants issues de la conception et donc évaluées par le constructeur dans des conditions nominales de fonctionnement (fiabilité intrinsèque). Ces informations peuvent être enrichies par les données issues du comportement en production de ces composants via le suivi de leurs durées de vie réelles enregistrées dans le système d'information de l'entreprise (fiabilité opérationnelle). La question qui se pose alors est de savoir combiner ces deux types d'information pour mieux cerner la fiabilité de ces composants et donc, par agrégation, reconstruire la fiabilité du système complexe (fiabilité prévisionnelle). Cette agrégation passera inexorablement par l'utilisation conjointe de techniques analytique et de simulation [BASI04].

Une fois cette étape franchie, le gestionnaire s'intéresse à la façon de maintenir son équipement de manière à ce qu'il continue à remplir sa mission (une fonction donnée, pour une durée donnée et ce, dans un environnement donné). Le système sera déclaré défaillant lorsque ses caractéristiques évoluent en dehors des tolérances définies lors de la conception ou s'il ne satisfait pas à une ou à plusieurs attentes du client.

Deux attitudes sont à envisager : attendre la défaillance du système avant d'intervenir pour le réparer (maintenance corrective) ou anticiper l'arrêt du système (maintenance préventive) pour ne pas subir les pannes. Dans les deux cas de figure, le gestionnaire doit supporter des coûts liés à l'arrêt de l'outil de production, et des coûts directs liés aux interventions réalisées sur le système et ce, pour assurer un niveau élevé de disponibilité de son équipement. Une stratégie de maintenance optimale consiste à trouver le compromis entre ces deux attitudes qui maximise la satisfaction du gestionnaire tenant compte du comportement dynamique du système, de ses caractéristiques de fiabilité et des contraintes économiques du gestionnaire. L'outil que nous présentons dans cet article tend à offrir une aide à la décision au gestionnaire confronté à ce problème.

2. Définition du problème

Nous cherchons, dans le cadre de cet article, à élaborer des stratégies de maintenance de systèmes multi composants. Un tel système, décrit par la figure 1, est défini par un ensemble de composants reliés entre eux et organisés en série ou en parallèle.

On considère que la redondance est active dans le cas de composants parallèles. Cela implique que l'ensemble des composants en parallèle peut fonctionner, avec au moins un composant en activité pour que le système puisse remplir sa fonction.

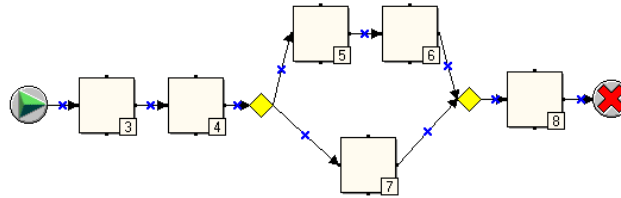


Figure 1 : Exemple de système multi-composants

On caractérise chaque composant du système par :

- la distribution de la loi de fiabilité (exponentielle, normale, uniforme ou Weibull)
- la distribution de la loi associée au temps de réparation préventive et corrective (normale ou constante)
- les coûts de l'intervention de maintenance préventive (C_p) et corrective (C_c) ($C_c > C_p$)
- la stratégie de maintenance pour chaque composant ainsi que leur mode de détection des pannes
- le taux de restauration des actions de maintenance compris entre zéro (l'âge du composant ne change pas) et un (remise à neuf du composant)

Il est nécessaire de définir le mode de détection des pannes. Dans chacun des cas, après détection de la panne, on appliquera un remplacement correctif du composant. Trois modes sont possibles :

- détection de la panne lors de l'arrêt du système (mode n°1)
- détection de la panne lors du remplacement d'un composant du système (mode n°2)
- détection automatique de la panne (mode n°3)

Nous avons considéré que les ressources nécessaires pour le remplacement préventif ou correctif des composants sont illimitées et immédiatement disponibles. Cette hypothèse ne limite en rien la démarche d'élaboration des stratégies de maintenance d'un système, présentée dans cet article. La plateforme, très ouverte, pourra retirer ces restrictions dans une nouvelle phase de développement.

3. Stratégies de maintenance dans la littérature scientifique

Nombreux sont les auteurs qui ont abordé dans leurs travaux, le développement de stratégies de maintenance. Nous avons choisi de détailler quatre stratégies classiques en lien avec les implémentations que nous avons réalisées dans le cadre de notre plateforme. Dans chacune de ces stratégies, chaque remplacement préventif coûte C_p et a une durée T_p . Si une défaillance est détectée, le composant est remplacé à un coût C_c et la durée du remplacement est de T_c .

3.1 Stratégie bloc (BRP)

La stratégie de remplacement périodique de type bloc a été abordée par Nakagawa en 1979 [NAKA79]. La politique de base de remplacement périodique consiste au remplacement du composant soit aux instants T , au coût C_p ; soit en cas de panne, au coût C_c . L'inconvénient majeur de cette stratégie est qu'elle ne tient pas compte de l'âge du composant.

3.2 Stratégie âge (ARP)

La politique de remplacement de type âge (Age Replacement Policy), proposée par Barlow et Proschan en 1965 [BARL65], consiste à remplacer le composant en cas de panne, au coût C_c ou après T unités de fonctionnement sans panne, au coût C_p . Cette stratégie évite de remplacer un composant presque neuf (car il faut qu'il ait atteint l'âge T pour être remplacé). Par contre, il est nécessaire de connaître le temps de fonctionnement du composant.

3.3 Stratégie MBRP

La stratégie MBRP (Modified Block Replacement Policy) est une généralisation de la stratégie bloc. On effectue le remplacement du composant à des périodes T fixées mais seulement si son âge est supérieur à une constante b . On évite ainsi l'inconvénient majeur de la stratégie bloc, c'est à dire remplacer un composant pratiquement neuf. Mais cette stratégie nécessite la connaissance de l'âge du composant et la détermination de deux paramètres (la période de remplacement T ainsi que le seuil b).

3.4 Stratégie opportuniste

Cette stratégie, contrairement aux stratégies précédentes, va prendre en compte les interactions entre les composants du système. Un composant subit une maintenance préventive s'il a travaillé pendant N unités de temps (identique à la stratégie âge). Mais il peut subir un remplacement préventif lorsque l'on doit effectuer un remplacement préventif ou correctif sur un des composants du système et s'il a travaillé pendant n unités de temps ($n < N$) [VERG79]. La politique de maintenance opportuniste est avantageuse quand il existe une économie d'échelle, c'est à dire lorsque le coût d'une maintenance groupée est inférieur à la somme des coûts des actions de maintenance séparées pour le critère coût par unité de temps ou lorsqu'il est possible de réaliser plusieurs remplacements à la fois pour le critère disponibilité (c'est notre cas car on considère que les ressources nécessaires pour le remplacement des composants sont infinies).

4. Simulation des actions de maintenance

L'utilisation de la simulation nous paraît presque incontournable si nous souhaitons élaborer des stratégies de maintenance de systèmes multi-composants. Elle permet de reproduire la dynamique du système et prévoir sa fiabilité. Elle permet également d'évaluer les stratégies de maintenance proposées a priori dans un souci d'optimisation des coûts et de la disponibilité.

La méthodologie que nous envisageons consiste à bien spécifier le système étudié, de décrire son architecture fonctionnelle et organisationnelle. Cette phase permettra d'établir les modèles intégrant les aspects de simulation et d'optimisation pour une gestion la maintenance des systèmes multi-composants, basée sur la fiabilité.

Pour pouvoir élaborer des stratégies de maintenance optimisées et les évaluer eu égard aux critères de coûts et de disponibilité, nous envisageons de générer des modèles de simulation du système étudié au départ de la phase de spécification.

Les systèmes que nous modéliserons peuvent être décrits de façon hiérarchique par un ensemble de paramètres et de variables liés à la fois au système et à ses composants. Les paramètres du système sont résumés comme suit :

- un identifiant
- la configuration du système (série, parallèle ou hybride)
- une variable fonctionnement qui permet de savoir si le système est en fonctionnement ou pas
- le temps de début des arrêts
- la durée des arrêts

Les paramètres des composants sont résumés comme suit :

- un identifiant
- l'état du composant : libre, prêt, en fin de remplacement, en activité, en remplacement préventif, en remplacement correctif, en panne, arrêt
- une variable fonctionnement qui permet de savoir si le composant est en fonctionnement ou pas
- la stratégie de maintenance et ses différents paramètres
- des compteurs de temps (temps restant avant le prochain remplacement préventif, avant la prochaine panne, avant la fin du remplacement)
- le temps de fonctionnement du composant (remis à zéro à chaque remplacement)
- le nombre de remplacement préventif et correctif
- le coût unitaire et total des remplacements préventifs et correctifs

- le temps de début des arrêts, la durée des arrêts
- le mode de détection de la panne

Durant la simulation, les composants peuvent subir trois évènements indépendants de l'état du système et des autres composants :

- une panne (fonction de la loi de fiabilité du composant)
- un remplacement préventif (fonction de la stratégie de maintenance du composant)
- la fin du remplacement préventif ou correctif (fonction du temps de remplacement du composant)

Ces évènements vont induire d'autres évènements dépendants de l'état du système et des autres composants qui sont :

- l'arrêt des composants en activité (fonction de la structure du système)
- la mise en remplacement correctif d'un composant en panne (fonction du mode de détection des pannes)
- la mise à l'état prêt d'un composant en fin de remplacement (si d'autres composants sont toujours en remplacement ou en panne)
- la mise en activité d'un composant à l'état prêt, à l'arrêt ou en fin de remplacement (si aucun composant n'est en remplacement ou en panne)
- la mise en remplacement préventif de composants dans le cas de la stratégie opportuniste

On calcule pour chaque composant le temps minimum avant le prochain évènement indépendant. Si la stratégie d'un composant est de type opportuniste, il est facile de déduire si le composant va subir un remplacement opportuniste suite aux remplacements préventifs d'autres composants (évènements indépendants) ; le composant doit en effet avoir atteint l'âge n . Par contre, il est plus difficile de déduire si le composant va subir un remplacement préventif suite aux remplacements correctifs d'autres composants du système. Il faut, en effet, déterminer dans ce cas et au préalable les composants qui vont subir un remplacement correctif (évènements dépendants).

Le schéma de fonctionnement de la simulation est présenté à la figure 2. Dès qu'un composant passe de l'état en fonctionnement à l'état de non fonctionnement (ou inversement), on doit mettre à jour l'état du système. Deux fonctions sont nécessaires. La première détermine le nouvel état du système en fonction des états de ses composants. La seconde fonction est utilisée pour la mise à l'arrêt de composants en série avec un composant ne fonctionnant plus. Ces deux fonctions sont représentées par « Gestion fct systèmes » et « Gestion arrêt ».

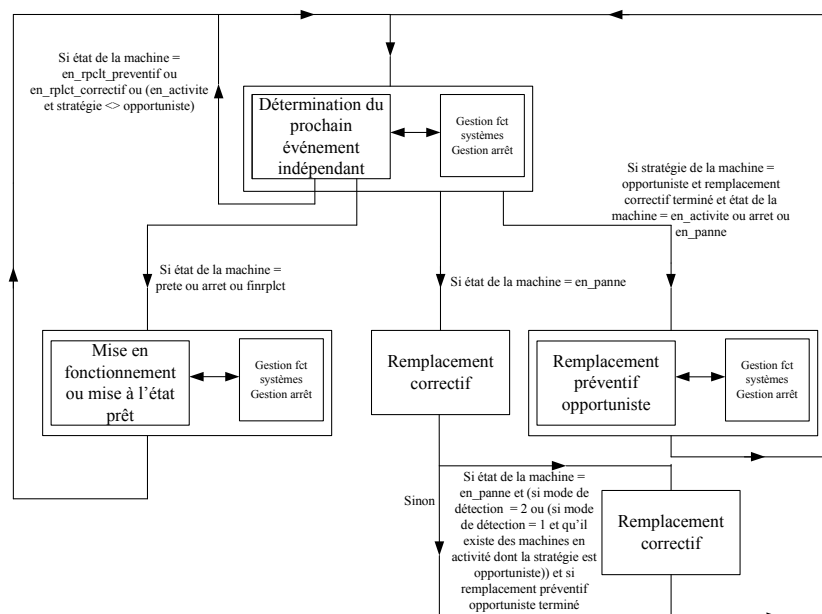


Figure 2 : Schéma de fonctionnement de la simulation

Pour modéliser les différentes stratégies, on utilise, pour chacune d'entre elles, un graphe d'état représentant les différents états possibles des composants et les événements que peuvent subir ces composants dans le cas de la stratégie considérée. Ces graphes sont présentés par les figures 3, 4, 5 et 6.

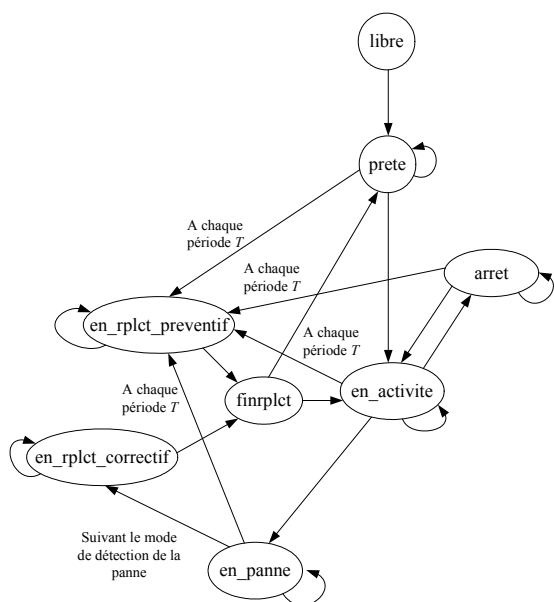


Figure 3 : Modélisation de la stratégie bloc

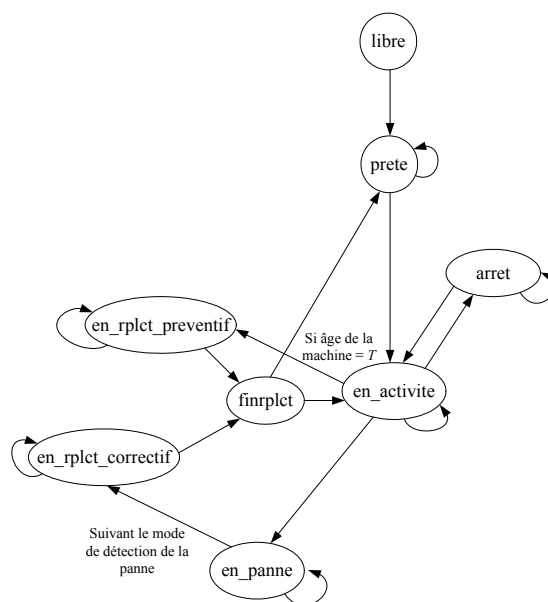


Figure 4 : Modélisation de la stratégie âge

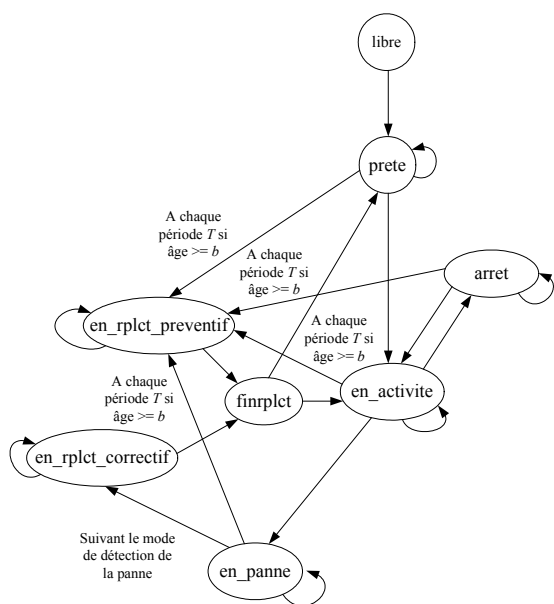


Figure 5 : Modélisation de la stratégie MBRP

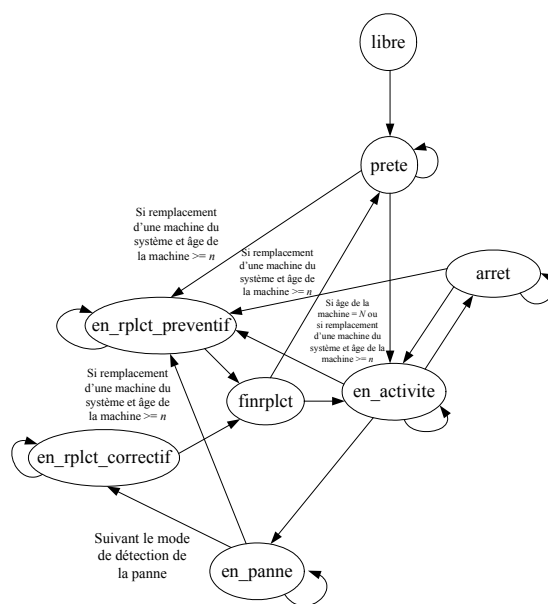


Figure 6 : Modélisation de la stratégie opportuniste

5. Optimisation des paramètres des stratégies

Les stratégies de maintenance préventive présentées nécessitent la détermination de paramètres, c'est à dire :

- la période de remplacement préventif T pour la stratégie âge et la stratégie bloc
- la période de remplacement préventif T et le seuil b pour la stratégie MBRP
- la période de remplacement préventif N et la variable n pour la stratégie opportuniste

Il existe des valeurs pour ces paramètres minimisant le coût par unité de temps de la maintenance ou maximisant la disponibilité du système. Ces valeurs sont considérées comme optimales et doivent être déterminées à l'aide de méthodes d'optimisation. On peut voir la représentation du coût par unité de

temps (figure 7) et de la disponibilité (figure 8) en fonction des paramètres $T1$ et $T2$ de la stratégie âge appliquée à deux composants en série. On voit clairement qu'il existe des valeurs optimales pour ces paramètres.

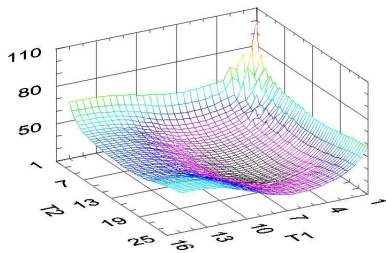


Figure 7 : Coût par unité de temps

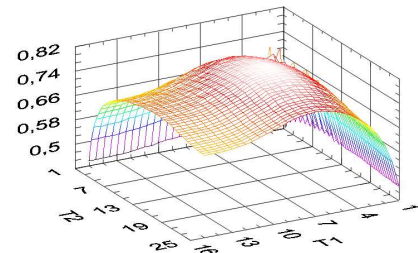


Figure 8 : Disponibilité

Pour déterminer la valeur des paramètres optimaux, nous utilisons un couplage entre le modèle de simulation et un module d'optimisation. Le couplage, tel qu'il est décrit par la figure 9, permet d'évaluer pour chaque proposition de paramétrisation (solution du module optimisation) la stratégie choisie jusqu'à satisfaire le critère d'arrêt [JAMA04].

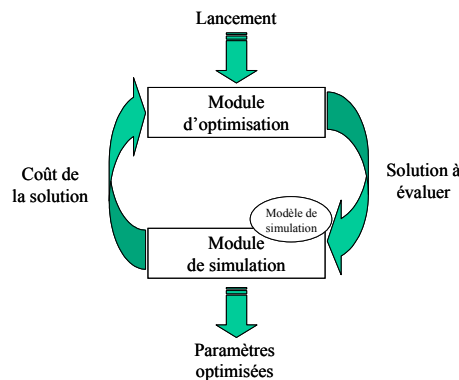


Figure 9 : Couplage simulation - optimisation

Le module d'optimisation utilise la méthode du polytope de Nelder-Mead développé par Nelder et Mead en 1965 [NELD65]. C'est une méthode d'optimisation locale, utilisant directement la valeur de la fonction objectif, sans utilisation des dérivées [CHEL99]. Cette méthode performante et simple à programmer se prête bien à une fonction objectif issue de la simulation, étant donné qu'elle est tolérante aux bruits dans les valeurs de la fonction objectif. L'algorithme a été adapté suivant Luersen et al. [LUER03] pour tenir compte des bornes et des contraintes sur les paramètres.

6. Présentation de la plateforme

Une interface permet de créer le système, de modéliser graphiquement ses composants et de définir les paramètres de chacun d'entre eux (figure 10). L'ensemble des informations est sauvegardé sous format XML. Ce format hiérarchique a été choisi parce qu'il est bien adapté à la description des systèmes rencontrés en maintenance. La simulation du fonctionnement du système est alors possible. Elle est supportée par le langage RAO développé par Artiba et al. [ARTI98]. L'utilisateur de la plateforme ne doit écrire aucun code du langage de simulation RAO, l'ensemble du modèle de simulation est généré automatiquement à partir de l'interface graphique.

Les résultats de la simulation peuvent être sous forme de diagrammes de Gantt représentant la répartition des temps de bon fonctionnement des composants et du système et de graphiques représentant l'évolution des coûts et l'évolution de la disponibilité du système. On peut également calculer toute une série d'indicateurs de performance comme la disponibilité des composants, le coût de préventif total ou par composant, la période d'indisponibilité du système et/ou des composants, etc. (figure 11).

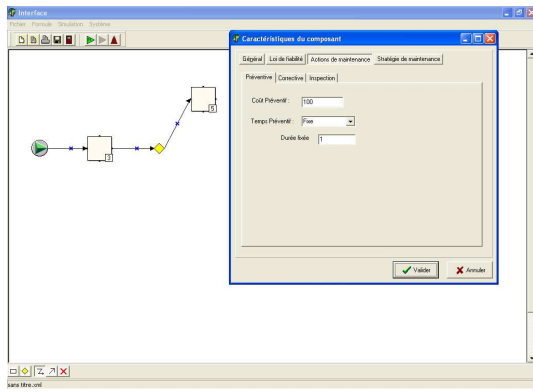


Figure 10 : Interface de création du système

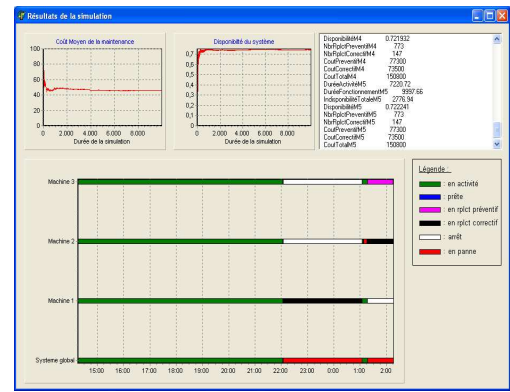


Figure 11 : Résultats de la simulation

Pour illustrer le fonctionnement de la plateforme, nous considérons le système simple décrit par la figure 12. Les résultats qui suivent peuvent être générés pour tout système créé à partir de la plateforme.

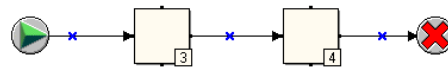


Figure 12 : Système composé de deux composants en série

Les paramètres des composants 3 et 4 sont résumés au tableau 1. Les lois de fiabilité utilisées sont des lois classiquement rencontrées en maintenance, et qui peuvent être obtenues à partir d'un historique des temps de panne des composants.

Tableau 1 : Paramètres des composants

Paramètres	Composant 3	Composant 4
Loi de fiabilité	Weibull($\alpha=2, \beta=5.5$)	Normale($\mu=10, \sigma=2$)
Coût du préventif	100	100
Temps du préventif	1	1
Coût du correctif	500	500
Temps du correctif	3	3
Mode de détection des pannes	Automatique	Automatique
Taux de restauration	1 (remise à neuf)	1 (remise à neuf)

La plateforme permet de générer la fiabilité de chacun des composants (figures 13 et 14). Grâce à la simulation, on peut aussi obtenir la fiabilité du système (figure 15). Cela est réalisé à partir d'un modèle de simulation générant des pannes du système et sauvegardant ces temps de panne pour pouvoir ainsi recréer l'histogramme.

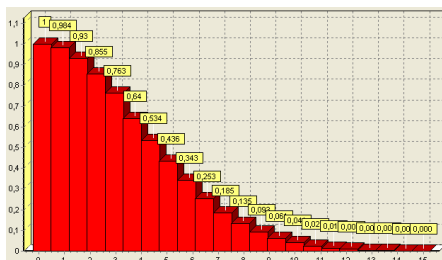


Figure 13 : Fiabilité du composant 3

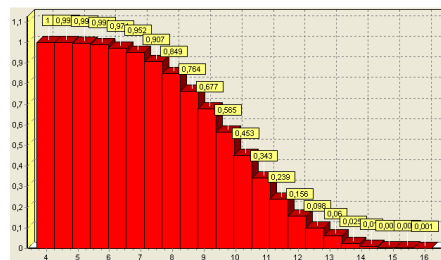


Figure 14 : Fiabilité du composant 4

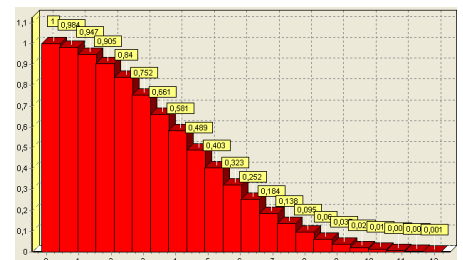


Figure 15 : Fiabilité du système

A partir de la plateforme, il est possible d'appliquer l'algorithme de Nelder-Mead pour trouver les paramètres optimaux de différentes stratégies pour la maintenance du système de la figure 12. Les critères à optimiser sont le coût par unité de temps (minimiser) et la disponibilité du système (maximiser). Les

paramètres de l’algorithme de Nelder-Mead utilisés sont ceux que l’on rencontre classiquement dans la littérature.

L’algorithme a été appliqué de façon à obtenir les paramètres optimaux des quatre stratégies décrites dans cet article. Nous avons à chaque fois optimisé le coût et la disponibilité. Les résultats de l’algorithme sont représentés au tableau 2, auquel on a ajouté les résultats de la maintenance corrective. La première ligne représente les paramètres optimaux pour le critère coût, la deuxième le coût optimal, la troisième la disponibilité correspondant aux paramètres du coût optimal, la quatrième les paramètres optimaux pour le critère disponibilité, la cinquième la disponibilité optimale et la dernière le coût correspondant aux paramètres de la disponibilité optimale. Les graphiques des figures 16 et 17 permettent de comparer les différentes stratégies, et on peut en tirer les conclusions suivantes :

- Les résultats de la maintenance corrective sont nettement inférieurs aux résultats des quatre stratégies de maintenance préventive. Les stratégies de maintenance préventive permettent au mieux de diminuer le coût de 34% ou d’augmenter la disponibilité de 25%.
- La stratégie donnant le coût minimum est la stratégie âge. Ce gain de coût se fait en détriment de la disponibilité puisque celle-ci est la moins élevée de toutes les stratégies préventives. Les paramètres optimaux de la stratégie opportuniste sont les mêmes paramètres optimaux que la stratégie âge, avec $N=n$ ce qui revient à appliquer la stratégie âge. La stratégie opportuniste n’a pas permis de trouver un coût inférieur étant donné qu’aucune économie d’échelle du point de vue des coûts n’a été intégrée.
- La stratégie donnant la disponibilité maximum est la stratégie opportuniste. Ce gain de disponibilité se fait en détriment du coût puisque celui-ci est le plus élevé de toutes les stratégies préventives.
- La stratégie MBRP n’a pas permis d’améliorer de manière prépondérante la stratégie bloc.
- Entre les deux solutions permettant de minimiser le coût et de maximiser la disponibilité, il existe un ensemble de solutions réalisant un compromis entre les deux critères. Le gestionnaire peut donc à partir d’un outil d’aide à la décision choisir la stratégie convenant le mieux à ses besoins.

Tableau 2 : Paramètres optimaux des stratégies

	Maintenance Corrective	Age	Bloc	MBRP	Opportuniste
Minimisation coût	∅	{T3=2,24; T4=6,19}	{T3=3,84; T4=10,34}	{T3=3,44; b3=0,70; T4=10,43; b4=3,26}	{N3=2,24; n3=2,24; N4=6,19; n4=6,19}
Coût*	79,64	52,60	55,67	55,36	52,61
Dispo	0,52	0,56	0,58	0,57	0,56
Maximisation disponibilité	∅	{T3=4,02; T4=7,10}	{T3=4,00; T4=8,00}	{T3=4,00; b3=0,25; T4=8,00; b4=0,00}	{N3=4,02; n3=0,64; N4=8,11; n4=1,2}
Dispo*	0,52	0,59	0,63	0,63	0,65
Coût	79,64	56,56	60,95	60,94	68,94

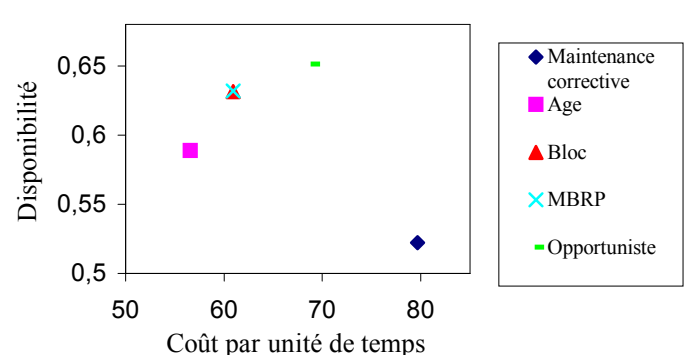
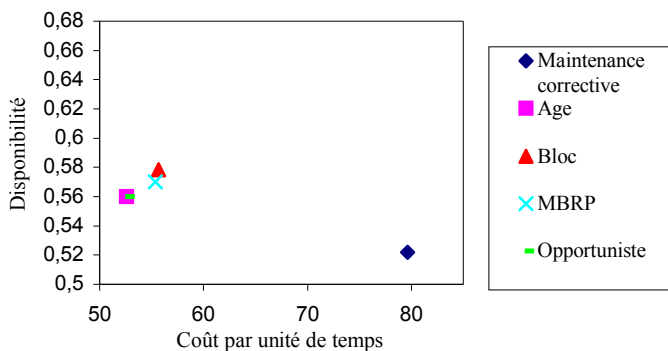


Figure 16 : Comparaison des stratégies pour le critère coût Figure 17 : Comparaison des stratégies pour le critère disponibilité

7. Conclusions et perspectives

Nous avons proposé une plateforme de modélisation, de simulation et d'optimisation des stratégies de maintenance pour des systèmes multi-composants, simple à utiliser, ne nécessitant pas de connaissances particulières et ce quelle que soit la complexité du système considéré. Cette plateforme doit encore être améliorée pour tenir compte d'autres stratégies utilisant le concept du remplacement par de l'utilisateur, prendre en considération les politiques d'inspection, prendre en compte les ressources humaines et matérielles de maintenance, et élargir le module d'optimisation pour intégrer d'autres méthodes. Nous comptons également offrir une réelle aide à la décision multicritère pour le choix de la stratégie de maintenance finale et pouvoir connecter la plateforme aux outils GMAO existant dans une entreprise.

Remerciements :

Cette recherche est financée par la Direction Générale des Technologies, de la Recherche et de l'Energie de la Région Wallonne, dans le cadre du projet OPTIMAIN.

Références :

- [ARTI98] A. Artiba, V.V. Emelyanov, S.I. Iassinovski. *Introduction to intelligent simulation: The RAO language*. Kluwer Academic Publishers. 1998.
- [BARD03] D. Bardey, F. Riane, A. Artiba. *To maintain or not to maintain: What should a risk-averse decision maker do ?*. IEPM03. Portugal, 2003.
- [BARL65] R. Barlow, F. Proschan. *Mathematical Theory of Reliability*. John Wiley & Sons. New York, 1965.
- [BASI04] O. Basile, P. Dehombreux, F. Riane. *Identification of reliability models for non repairable and repairable systems with small samples*. Proceedings of the IMS'2004, Advances in Maintenance and Modeling, Simulation and Intelligent Monitoring of Degradation. Arles, 2004.
- [BERE04] C. Bérenguer, E. Châtelet, Y. Langeron. *Modelling and Simulation of Maintenance Strategies Using Stochastic Petri nets*. MMR. Santa Fe, 2004.
- [CHEL99] R. Chelouah. *Adaptation aux problèmes à variables continues de plusieurs métaheuristiques d'optimisation combinatoire : la méthode tabou, les algorithmes génétiques et les méthodes hybrides. Application en contrôle non destructif*. Thèse de Doctorat de l'Université de Cergy-Pontoise. Décembre 1999.
- [JAMA04] M.A. Jamali, O. Roux, D. Ait-Kadi, A. Artiba. *Intégration des algorithmes d'optimisation et des méthodes de simulation pour l'analyse de stratégies de maintenance des systèmes sujets à des défaillances aléatoires*. JTEA. Egypte, 2004.
- [LUER03] M.A. Luersen, R. Le Riche, F. Guyon. *A constrained, globalized, and bounded Nelder-Mead method for engineering optimization*. Springer-Verlag. 2003.
- [MARS00] M. Marseguerra, E. Zio, *Optimizing maintenance and repair policies via a combination of genetic algorithms and Monte Carlo simulation*. Reliability Engineering and System Safety 68, p69-83. 2002.
- [MCCA65] J.J. McCall. *Maintenance policies for stochastically failing equipment: a survey*. Management Sciences 11, p493-524. 1965.
- [NAKA79] T. Nakagawa. *Optimum policies when preventive maintenance is imperfect*, IEEE Transactions on Reliability R-28 4, p331-332. 1979.
- [NELD65] J.A. Nelder, R. Mead. *A simplex method for function minimization*. The Computer Journal Vol. 7, p308-313. 1965.
- [VATN97] J. Vatn. *Maintenance optimisation from a decision theoretical point of view*. Reliability Engineering and System Safety 58, p119-126. 1997.
- [VERG79] R.C Vergin, M. Scriabin. *Maintenance scheduling for multicomponent equipment*. AIIE Transactions 9, p297-305. 1979.
- [WANG02] H. Wang. *A survey of maintenance policies of deteriorating systems*. European Journal of Operational research 139, p469-489. 2002.