

OPTIMAIN : PLATE-FORME D'ÉLABORATION DE STRATÉGIES DE MAINTENANCE POUR LA GESTION DES SYSTÈMES COMPLEXES

Guillaume FLEURQUIN*, Benoît ROLAND**,
Olivier BASILE***, Fouad RIANE****, Pierre DEHOMBREUX*****

Résumé. - Dans le cadre de cet article, nous présentons la plate-forme OPTIMAIN destinée à aider le gestionnaire dans l'optimisation de la gestion de la maintenance de son système de production. OPTIMAIN s'oriente principalement vers l'élaboration de stratégies de maintenance de systèmes complexes. Il est fondé sur une modélisation combinant optimisation et simulation, capable de reproduire le comportement dynamique des systèmes soumis à différentes stratégies de maintenance, ceci en tenant compte de leur fiabilité et de la logistique de maintenance. L'objectif poursuivi par OPTIMAIN est d'offrir un outil simple d'utilisation permettant, en les comparant, de déterminer la politique optimale à adopter. Deux critères de performance sont adoptés : le coût total moyen de maintenance par unité de temps, qui est à minimiser et la disponibilité stationnaire du système, qui est à maximiser. Ce papier décrit en détail l'architecture de la plate-forme ainsi qu'une étude de cas illustrant ses fonctionnalités.

Mots-clés : Intégration, Optimisation, Simulation, Stratégies de maintenance.

* Chercheur, Faculté Polytechnique de Mons, Belgique, guillaume.fleurquin@fpms.ac.be.

** Doctorant, Facultés Universitaires Catholiques de Mons, Belgique, benoit.roland@fucam.ac.be.

*** Assistant, Faculté Polytechnique de Mons, Belgique, olivier.basile@fpms.ac.be.

**** Professeur, Facultés Universitaires Catholiques de Mons, Belgique, fouad.riane@fucam.ac.be.

***** Professeur, Faculté Polytechnique de Mons, Belgique, pierre.dehombreux@fpms.ac.be.

1. Introduction

La gestion de la maintenance d'installations industrielles est devenue, au fil des ans, un facteur de compétitivité. Une bonne stratégie de maintenance permet en effet de garantir une disponibilité élevée des équipements, tout en minimisant les coûts liés aux interventions. Une telle politique de maintenance peut être définie comme un ensemble d'actions qui sont ordonnées et exécutées selon certaines séquences.

La littérature aborde ce sujet sous deux angles différents : d'une part on trouve des politiques de maintenance établies pour des systèmes assimilés à un seul composant et d'autre part des politiques adaptées à des systèmes multi-composants. Les premières politiques élaborées, ainsi que nombre des plus récentes, se sont appuyées sur une description mono-composant des systèmes étudiés. Les systèmes complexes hybrides nécessitant une description multi-composants plus complexe sont moins étudiés. La littérature scientifique reste néanmoins abondante sur le sujet (Marseguerra (2002), McCall (1965), Wang (2002)). Des revues comme celles de Wang présentent ainsi les différentes analyses pour des systèmes décrits par un seul composant et les développements élaborés pour les systèmes complexes.

Les politiques de maintenance pour une analyse à un seul composant reposent sur les fiabilités intrinsèques et/ou opérationnelles ; on se réfère soit aux données du constructeur qui correspondent à des conditions nominales de fonctionnement (fiabilité intrinsèque), soit aux données historiques des entreprises qui illustrent les comportements des composants in situ (fiabilité opérationnelle). Lorsque cela est possible, cette dernière approche reste plus efficace car l'exploitation des équipements est souvent notablement différente des conditions nominales. Les systèmes multi-composants requièrent également l'étude des fiabilités opérationnelles et/ou intrinsèques, mais nécessitent en plus une analyse de la structure fonctionnelle des équipements afin d'obtenir la fiabilité prévisionnelle qui caractérise de tels systèmes.

Afin d'estimer les performances des différentes stratégies de maintenance, certains critères doivent être sélectionnés. Les plus couramment utilisés sont le coût total moyen sur un horizon donné et la disponibilité stationnaire du système.

Dans ce travail, nous allons présenter le développement d'une plate-forme d'aide à la décision qui permet d'une part d'évaluer la fiabilité de systèmes complexes au moyen de techniques analytiques et de simulation (Basile, 2004), et d'autre part de simuler et d'optimiser le choix de différentes stratégies de maintenance pour de tels systèmes.

La suite du papier reprend, en section 2, les différentes stratégies de maintenance envisagées dans notre étude. La section 3 est consacrée à la description complète de la plate-

forme OPTIMAIN, dont les fonctionnalités sont illustrées en section 4 par l'étude d'un système fictif inspiré d'un cas industriel réel.

2. Stratégies de maintenance

2.1 Définition du problème

Notre objectif est d'optimiser la gestion de la maintenance de systèmes complexes multi-composants de sorte à minimiser le coût total moyen des interventions par unité de temps ou à maximiser la disponibilité stationnaire de ces équipements. Ces derniers sont définis par un ensemble de composants interconnectés en série et/ou en parallèle. Les stratégies de maintenance suivantes entrent dans notre cadre d'étude :

- la stratégie de maintenance corrective. Aucune action préventive n'est entreprise. Les composants ne sont remplacés qu'à la panne. C'est la stratégie vers laquelle on tend théoriquement lorsque les périodicités de maintenance préventive tendent vers l'infini.
- la stratégie de maintenance préventive de type bloc. La stratégie bloc (Bloc Replacement Policy), proposée par Barlow et Proschan (1965), induit un remplacement périodique des composants d'un système. Suivant cette stratégie, un composant est changé au coût C_c en cas de panne et au coût C_p préventivement toutes les T périodes fixées (ce quel que soit le temps de fonctionnement du composant). Cette politique comporte un seul paramètre à fixer (T) et son principal inconvénient est de ne pas tenir compte de l'âge des composants, autorisant de la sorte le remplacement d'éléments peu usagés.
- la stratégie de maintenance préventive de type âge. Introduite par Barlow (1965), elle propose de remplacer un élément non opérationnel (en panne) au coût C_c et de remplacer préventivement tout composant après T unités de temps de fonctionnement sans panne au coût C_p . Cette stratégie ne possède qu'un unique paramètre (T) et évite le remplacement d'éléments presque neufs, mais nécessite de connaître le temps de fonctionnement de ces derniers.
- la stratégie de maintenance préventive de type bloc modifiée (Modified Bloc Replacement Policy). Elle est une extension de la stratégie bloc définie plus haut. En effet, les remplacements préventifs se font également à des périodes T fixées, mais uniquement si le composant considéré a atteint une certaine limite d'âge constante b . De cette manière, on contourne le problème de la stratégie bloc BRP en évitant le remplacement d'éléments quasiment neufs. Tout comme la stratégie âge, la politique MBRP requiert la connaissance de l'âge des composants. L'application de celle-ci

implique la détermination de deux paramètres : la période de remplacement T et le seuil d'âge b .

- la stratégie de maintenance préventive fondée sur le risque (Risk Based Strategy). Basée sur le même schéma de fonctionnement que la stratégie MBRP, elle en diffère par les préconditions à vérifier pour engager une intervention préventive. En effet, au lieu de baser cette décision sur la seule donnée de l'âge résiduel, la stratégie RBS suggèrera de réaliser les remplacements préventifs toutes les T périodes fixées, mais uniquement si le risque de défaillance des composants a atteint un seuil r donné (Roux et al, 2005). Ce risque est capturé par la probabilité de défaillance conditionnelle entre les dates kT et $(k+1)T$.
- la stratégie de maintenance opportuniste. Contrairement aux politiques précédentes, la stratégie opportuniste va prendre en compte les interactions entre les différents composants d'un système. Un élément subit une maintenance préventive lorsqu'il a fonctionné durant N unités de temps (conformément à la stratégie âge). Mais il peut également subir un tel remplacement préventif si l'on doit procéder au changement (préventif ou correctif) d'un autre composant du système et que son âge est supérieur à $n < N$ unités de temps de fonctionnement (Vergin, 1979). Cette politique de maintenance opportuniste s'avérera payante s'il existe une économie d'échelle. Ceci signifie que, suivant l'objectif poursuivi, le coût d'une maintenance groupée est inférieur à la somme des coûts des actions séparées (minimisation du coût par unité de temps) ou qu'il est possible d'effectuer des remplacements simultanés (maximisation de la disponibilité).

3. Plate-forme OPTIMAIN

Les questions principales auxquelles un gestionnaire doit répondre lorsqu'il s'agit de gérer la maintenance d'un parc machines sont : « Quand intervenir ? » et « Quelles actions effectuer ? ».

Quand effectuer les opérations de maintenance ? Cela dépend à la fois des caractéristiques de chaque composant et de la structure du système. De plus, les objectifs du gestionnaire doivent être pris en compte : désire-t-il maximiser la disponibilité ? Minimiser les coûts ? Recherche-t-il un compromis possible ? Il apparaît que des temps optimaux de maintenance peuvent exister et qu'ils sont fonction du système et des objectifs. Une approche analytique de résolution serait possible, mais la complexité inhérente à cette méthode est un frein à son utilisation. C'est pourquoi la plate-forme OPTIMAIN repose sur la simulation des systèmes de production en vue d'en estimer les meilleures stratégies de maintenance. Cet aspect de

simulation est en outre couplé à une optimisation des paramètres des stratégies de maintenance afin d'aider le gestionnaire dans son choix de la stratégie la plus appropriée.

Quelles actions entreprendre ? La simulation permet d'évaluer la pertinence et l'efficacité des différentes stratégies de maintenance envisagées. La plate-forme OPTIMAIN intègre plusieurs stratégies parmi les plus employées et permet de définir un type de maintenance pour chacun des composants d'un système. Les résultats (disponibilité, coûts horaires...) de la simulation donnent tous les renseignements permettant au gestionnaire de prendre les décisions adéquates pour appliquer la meilleure stratégie de maintenance.

Afin de répondre à ces questions par le déploiement de l'outil OPTIMAIN, il est nécessaire de suivre une certaine méthodologie illustrée par la figure 1 (Lust, 2005a). La première étape consiste en la représentation graphique du système réel, sa spécification et la caractérisation de ses composants. Viennent ensuite la simulation et l'optimisation du système qui nécessitent les caractéristiques fiabilistes de ce dernier. Enfin, il est nécessaire de valider la stratégie de maintenance retenue par son évaluation avant de la mettre en œuvre.

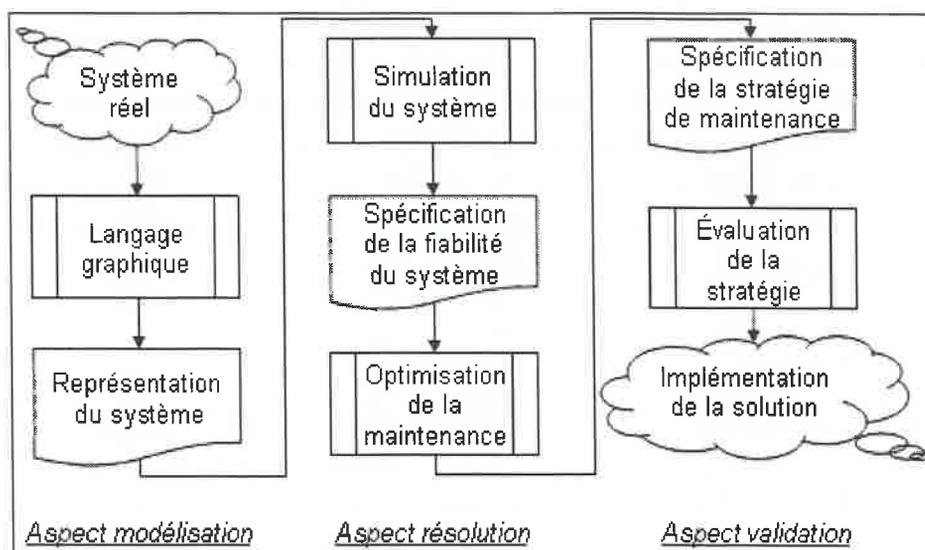


Figure 1 : Méthodologie de l'outil d'aide à la décision.

L'élaboration de cette plate-forme demande de poser certaines hypothèses de travail. Ainsi, les caractéristiques des composants ont été fixées comme suit :

- une loi de distribution de fiabilité (exponentielle, normale, uniforme, Weibull...);
- une loi de distribution du temps de maintenance préventive ou corrective (constante ou normale);

- des coûts de maintenance préventive C_p et corrective C_c ($C_p \leq C_c$) ;
- une stratégie de maintenance ;
- un mode de détection des pannes (automatique, à l'arrêt du système ou lors du remplacement d'un composant du système) ;
- un taux de restauration des actions de maintenance compris entre 0 (l'âge du composant ne change pas) et 1 (le composant est remis à neuf).

En outre, nous considérons la redondance d'éléments parallèles comme active. En d'autres termes, cela signifie que la totalité des composants redondants fonctionne simultanément, et que le système complet pourra remplir sa fonction tant qu'un de ces composants sera en activité.

Enfin, nous considérons que les ressources nécessaires aux remplacements préventifs et correctifs sont illimitées et immédiatement disponibles. Cette hypothèse ne limite en rien la démarche d'élaboration des politiques de maintenance suivie dans cet article. En effet, comme nous le verrons par la suite, cette démarche cherche à fixer des périodicités de maintenance optimales, indépendamment des problèmes de ressources. Il est en effet plus commode d'inclure les limitations de ressources dans une phase d'ordonnancement des actions de maintenance qui interviendrait une fois la périodicité optimale déterminée. Cette hypothèse de disponibilité illimitée se justifie encore en précisant que, jusqu'à présent, aucun des équipements stratégiques étudiés n'était soumis à un quelconque problème de ressources ; les entreprises veillant à ce que ces dernières soient disponibles en permanence pour ce type de matériel.

3.1 *Modélisation*

L'étape première de toute étude est l'analyse du système. Cela passe, comme nous l'avons évoqué en introduction, par l'étude de la structure fonctionnelle des équipements. Couplés à cette dernière, la récolte et le tri des données historiques de fonctionnement permettent d'extraire les lois de fiabilités des différents composants sélectionnés. Si les données historiques se révèlent inexploitable (trop peu de données), l'utilisation d'abaques par exemple nous fournira des lois empiriques. En outre, les données économiques (coûts de main d'œuvre et des pièces de rechange, coûts d'arrêts de production) permettent de compléter le schéma-bloc du système. L'interface d'OPTIMAIN s'appuie sur un langage graphique afin de schématiser simplement ce modèle, comme l'évoque la figure 1. L'utilisateur de la plate-forme doit fournir les caractéristiques du modèle précédemment évoquées. Une fois les données fonctionnelles et organisationnelles fournies, nous disposons de tous les éléments permettant d'établir les modèles de gestion des systèmes multi-composants, ces modèles intégrant à la fois simulation et optimisation.

3.2 *Fiabilité du système*

À ce stade, l'utilisateur dispose d'un schéma-bloc de son équipement, entièrement renseigné de toutes les données fiabilistes, temporelles ou économiques utiles. La première chose à faire est de vérifier l'adéquation de ce modèle avec la réalité. Le moteur de simulation trouve son premier intérêt dans l'élaboration de la fiabilité du système à partir de sa structure et des lois de fiabilité. La durée de vie moyenne est donc estimée par simulation, ce qui valide ou non le modèle élaboré. Dans le second cas, il faut revoir soit la structure (manque-t-il un composant critique ?) soit les lois de fiabilités des composants. Une fois le modèle validé, les stratégies de maintenance peuvent être introduites.

3.3 *Simulation des stratégies de maintenance*

Notre objectif est de pouvoir évaluer les performances de n'importe quelle combinaison de stratégies de maintenance, pour des composants ayant des lois de fiabilités quelconques (parmi celles implémentées). En conséquence, la simulation apparaît incontournable pour reproduire le comportement dynamique de nos systèmes, car une approche analytique n'est alors plus envisageable. Afin de gérer au mieux la simulation, différents paramètres sont nécessaires. Certains sont globaux (pour tout le système), d'autres sont spécifiques à chaque composant. Les paramètres globaux sont les suivants :

- un identifiant
- la configuration du système (série, parallèle ou hybride) qui se détermine grâce à l'élaboration du modèle au moyen de l'interface graphique
- une variable de fonctionnement qui renseigne sur l'état du système (en arrêt ou en fonctionnement)
- le temps de début des arrêts, employé pour toute action préventive ou corrective endurée par le système
- la durée des arrêts qui apporte une information sur la disponibilité du système.

Pour décrire l'évolution de chacun des composants, il faut définir d'autres paramètres :

- un identifiant
- l'état du composant : en activité, en panne, en remplacement correctif, en remplacement préventif. D'autres états ont été définis pour décrire la dynamique du composant et seront évoqués par la suite

- une variable fonctionnement. Elle renseigne l'état du composant (en arrêt ou en fonctionnement)
- la stratégie de maintenance et ses différents paramètres. Il s'agit là des stratégies déjà décrites au paragraphe 2.2
- des compteurs de temps (temps restant avant le prochain remplacement préventif, la prochaine panne ou la fin du remplacement). Ils déterminent l'évolution d'un composant en fonction de son paramétrage
- le temps de fonctionnement du composant (remis à zéro à chaque remplacement). Il est couplé aux compteurs de temps pour étudier l'évolution du composant, et seul il est exploité dans le calcul de disponibilité
- le nombre de remplacements correctifs et préventifs. Leur étude permet d'émettre une opinion sur la pertinence de la stratégie envisagée (trop de préventif ? Trop de correctif ?)
- les coûts unitaires et totaux des remplacements préventifs et correctifs. Les coûts totaux permettent d'extraire le coût moyen de la maintenance et d'évaluer la stratégie
- le temps de début des arrêts. Il est employé pour une action préventive ou corrective
- la durée des arrêts. Elle apporte au final une information sur la disponibilité du composant
- le mode de détection de la panne, développé au point 2.1.

Les composants peuvent subir deux types d'événements : d'une part ceux qui sont indépendants de l'état du système et d'autre part ceux qui découlent des modifications de l'état du système imposées par les événements précédents. Les événements indépendants sont :

- une panne. Elle est fonction de la loi de fiabilité du composant ;
- un remplacement préventif. Il est fonction de la stratégie de maintenance du composant ;
- la fin du remplacement préventif ou correctif. Elle est fonction des temps de remplacement du composant.

Lorsqu'un composant subit l'un de ces événements, cela induit des transformations de l'état du reste du système, qui évolue alors vers un nouvel état. Explicitons ces modifications :

- l'arrêt des composants en activité. En fonction de l'organisation du système, l'arrêt d'un composant entraîne celui de tous ou d'une partie des autres composants (et éventuellement celui du système) ;
- la mise en remplacement correctif d'un composant en panne. Ce changement d'état est fonction du mode de détection des pannes ;
- la mise à l'état *prêt* d'un composant en fin de remplacement. Ce composant est alors prêt à l'emploi mais le système, lui, ne peut être remis en fonctionnement en raison de l'indisponibilité d'autres éléments ;
- la mise en activité d'un composant à l'état *prêt*, à l'arrêt ou en fin de remplacement. Le système peut être mis en fonctionnement, le composant est donc mis en action ;
- la mise en remplacement préventif de composants dans le cadre de la stratégie opportuniste.

Pour les stratégies bloc, âge et MBRP, la gestion des temps d'action (dates d'occurrence du prochain événement indépendant) ne pose pas de problème. En fonction des paramètres et des lois de fiabilité fournis par le gestionnaire, ces dates (de la prochaine panne ou du prochain remplacement préventif) peuvent être déterminées indépendamment. Le cas de la stratégie opportuniste est légèrement différent. Le remplacement opportuniste, faisant suite aux remplacements préventifs d'autres composants, ne fait intervenir que des événements indépendants. Déterminer si le composant a atteint l'âge n suffit à décider de son éventuelle maintenance. Toutefois, un remplacement préventif suite aux remplacements correctifs d'autres composants du système est plus délicat car il introduit des événements dépendants : la mise en remplacement correctif d'un ou plusieurs composant(s). Il est alors nécessaire de connaître à l'avance les composants qui vont subir un remplacement correctif.

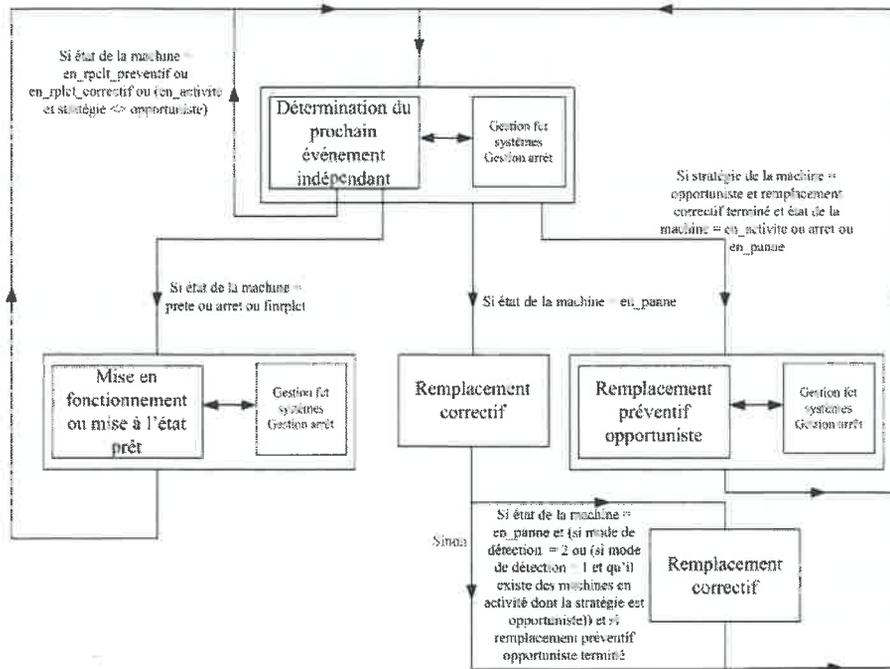


Figure 2 : Schéma de fonctionnement de la simulation.

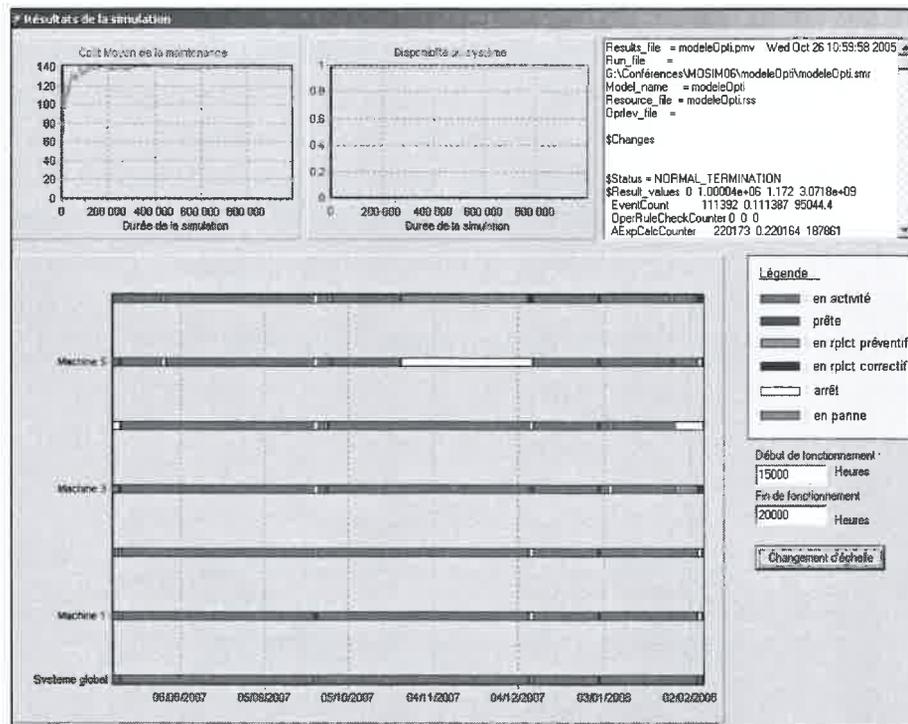


Figure 3 : Interface de résultats proposée par OPTIMAIN.

La simulation repose sur le schéma de la figure 2. Elle fait en outre appel à deux fonctions, appelées *Gestion arrêt* et *Gestion fct systèmes*. La première détermine quels sont les composants défaillants ou ne pouvant plus fonctionner suite à l'arrêt (panne, maintenance) d'un autre composant en série. La seconde établit le nouvel état global du système en fonction de l'état de chacun de ses composants.

La figure 3 présente l'interface de résultats de la plate-forme OPTIMAIN pour une simulation type. Quatre parties sont visibles. Le premier graphe présente l'évolution du coût moyen de la maintenance calculé sur une durée suffisamment longue. La disponibilité du système (deuxième graphe) se stabilise très rapidement, après un passage de 0 (le système est en arrêt au début de la simulation) à 1 (passage de l'état *prêt* à l'état *en fonctionnement* du système). La fenêtre de texte en haut à droite est une copie du fichier résultat du simulateur. De très nombreuses informations y sont présentes, depuis les noms des fichiers du modèle aux valeurs moyennes du coût et de la disponibilité ainsi que les écarts-types.

Enfin, le diagramme de Gantt présente l'évolution de l'état des différents modes de défaillance et du système global. Les résultats de simulation permettent au gestionnaire de vérifier la validité du modèle élaboré. En effet, si les données issues de la simulation ne se révèlent guère concluantes, il peut être nécessaire de retravailler la modélisation (séparation d'un mode de défaillance en plusieurs, révisions des paramètres des lois de fiabilité identifiées, etc.) pour obtenir un modèle au comportement plus réaliste.

3.4 Optimisation

Les stratégies de maintenance préventive évoquées au point 2.2 sont définies chacune par des paramètres à déterminer. Pour rappel, ces paramètres sont les suivants :

- la période T de remplacement préventif (stratégies bloc et âge) ;
- la période T de remplacement préventif et le seuil d'âge b (stratégie MBRP) ;
- la période T de remplacement préventif et le seuil de risque r (stratégie RBS) ;
- la période N de remplacement préventif et le seuil d'âge n (stratégie opportuniste).

Suivant les valeurs que prennent ces différents paramètres, les politiques de maintenance offrent des résultats différents. Il s'agit dès lors de trouver les valeurs optimales permettant soit de minimiser le coût par unité de temps, soit de maximiser la disponibilité de l'installation. Pour ce faire, nous avons recours aux méthodes d'optimisation (il faut alors s'assurer de la convexité de la fonction coût et de la concavité de la fonction disponibilité).

La détermination de ces valeurs optimales passe par le couplage de la simulation et de l'optimisation. Ce couplage permet d'évaluer les différentes stratégies sur base des paramétrages issus de l'optimisation, et ce jusqu'à satisfaire un certain critère d'arrêt (Jamali 2004). L'algorithme d'optimisation retenu est le polytope de Nelder-Mead (Nelder 1965). Il s'agit là d'une méthode locale utilisant directement la valeur de la fonction objectif sans connaissance de ses dérivées. Notons que l'algorithme tient compte de l'adaptation de Luersen et al. (2003) permettant l'introduction de bornes et de contraintes sur les paramètres.

Cette méthode a été sélectionnée pour sa simplicité de mise en œuvre, sa rapidité d'exécution et sa tolérance au bruit, ces caractéristiques faisant d'elle une méthode propice à la recherche d'extrémum d'une fonction objectif issue de la simulation (Lust, 2005b).

Concrètement, l'objectif est d'obtenir un ensemble de valeurs correspondant aux paramètres des stratégies de maintenance des composants du système. L'utilisateur fixe les n paramètres initiaux des stratégies de maintenance. Prenons l'exemple d'un système mono-composant sur lequel on désire appliquer une stratégie bloc. L'utilisateur fixe une valeur initiale de la périodicité, en se basant sur le temps de bon fonctionnement par exemple (dans ce cas, $n = 1$). L'optimisation débute par le calcul de $n + 1$ ensembles de valeurs des n paramètres. Ces ensembles sont pris autour des valeurs initiales. La simulation est ensuite exploitée pour évaluer les performances sur le système modélisé de chacun de ces ensembles de paramètres, en termes de coût ou de disponibilité. Ils sont ensuite classés par ordre décroissant de performance. Les meilleurs sont conservés, les autres modifiés pour se « rapprocher » du minimum supposé. Une fois ces nouveaux $n + 1$ ensembles obtenus, leurs performances sont également évaluées par simulation, ils sont classés et modifiés si nécessaire. Au fur et à mesure de ces itérations de couplage, les $n + 1$ ensembles vont converger vers un minimum. Le critère d'arrêt est calculé sur la base de la « distance » entre ces ensembles.

Ainsi, chaque paramètre de la stratégie de maintenance appliquée à un composant est un paramètre à optimiser. La complexité de calcul augmente donc assez vite, et cette méthode, choisie pour sa rapidité et sa simplicité, atteint ses limites dans le cas de systèmes trop complexes (sensibilité à l'initialisation).

D'autres méthodes ont donc été développées (mais non intégrées) afin d'augmenter la robustesse de l'optimisation tout en restant couplées à la simulation, ce qui reste une condition nécessaire de rapidité d'exécution. On notera également que la configuration fonctionnelle du système comme les stratégies impliquées peuvent être quelconques : les seules différences viennent du nombre de paramètres à optimiser.

4. Étude de cas

Nous allons illustrer notre propos par une étude de cas basée sur une étude industrielle réelle. Celle-ci se décomposera en plusieurs étapes. Nous commencerons par la modélisation fonctionnelle, fiabiliste et économique. Nous illustrerons ensuite le principe d'optimisation implémenté en l'appliquant à une stratégie MBRP pour l'ensemble des composants du système. Enfin, nous évaluerons les performances des différentes stratégies en termes de coûts et/ou de disponibilité.

Pour une étude complète, il faut optimiser et évaluer toutes les stratégies pour chaque composant, mais nous ne présenterons ici que les résultats les plus simples et pertinents retirés de l'étude. Il est également à noter que les résultats d'optimisation ne sont pas employés tels quels, mais sont arrondis et adaptés selon la structure du système.

4.1 Modélisation

Le système étudié, illustré par la figure 4 se compose de six postes auxquels sont associés quatre modes de défaillance. Il comporte deux branches parallèles comprenant les postes 3 et 4 en redondance active, elles-mêmes en série des postes 1 et 2. Les composants redondants sont identiques et donc soumis aux mêmes modes de défaillance.

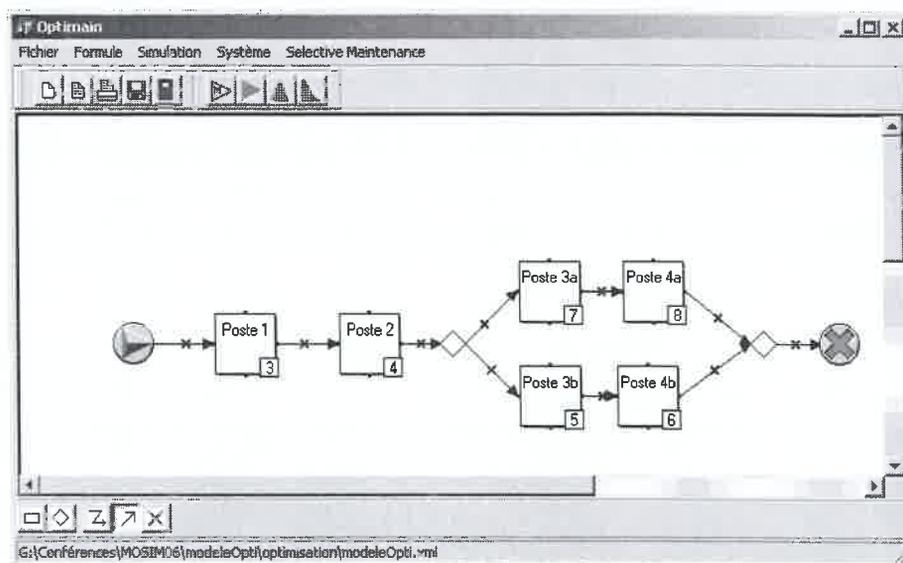


Figure 4 : Système multi-composants hybride étudié.

Les coûts fixes de remplacement des quatre types de machines ainsi que les temps de maintenance associés à chacun d'eux sont repris dans le tableau 1.

Équipement	C_p [€]	C_c [€]	Temps de maintenance	
			préventif [h]	correctif [h]
Poste 1	5233	21455	6	12
Poste 2	1248	6241	30	48
Poste 3	9358	11697	24	24
Poste 4	3027	9231	36	36

Tableau 1 : Coûts fixes et temps de maintenance des différents types d'équipement.

Équipement	η	B	MTBF [h]
Poste 1	10364	2.3	9216
Poste 2	9883	3.1	8856
Poste 3	3102	3.8	2815
Poste 4	6043	1.3	5572

Tableau 2 : Paramètres des lois de Weibull des différents types d'équipement

De plus, tout arrêt de l'équipement engendre un coût horaire de 4200 €/h, et des coûts de main d'œuvre de 230 €/h.

Les lois de fiabilité des différents composants ont pu être identifiées grâce à l'historique des pannes de ceux-ci. Les fiabilités liées à chacun des modes de défaillance suivent une même distribution : une loi de Weibull dont les paramètres sont donnés dans le tableau 2.

Les lois de fiabilité déterminées, on peut alors obtenir par simulation les temps moyens de bon fonctionnement (MTBF) de chacun des postes (voir tableau 2). Notons que ces temps sont une moyenne sur dix simulations. La simulation permet également de trouver le temps moyen entre deux défaillances pour le système complet. La figure 5 nous montre que le MTBF de ce dernier est de l'ordre de 2837 heures.

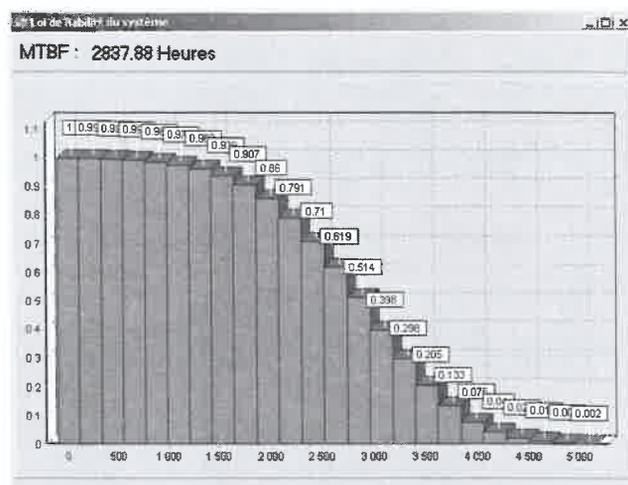


Figure 5 : Loi de fiabilité du système.

Finalement, nous considérons que la détection des pannes se fait à l'arrêt du système, et que le taux de restauration des éléments non opérationnels est de 1 (*as good as new*).

4.2 Optimisation

Rappelons que la phase d'optimisation tient à spécifier les paramètres optimaux des différentes politiques de maintenance, au sens du coût ou de la disponibilité, par application de l'algorithme de Nelder-Mead. La figure 6 présente l'évolution de la performance des solutions estimées pour l'optimisation de la disponibilité de la stratégie opportuniste, depuis les moins bonnes dans les premières itérations, jusqu'à la solution optimale. L'algorithme minimise les valeurs de la fonction objectif, c'est donc ici l'opposé de la disponibilité qui est minimisée, d'où la courbe décroissante.

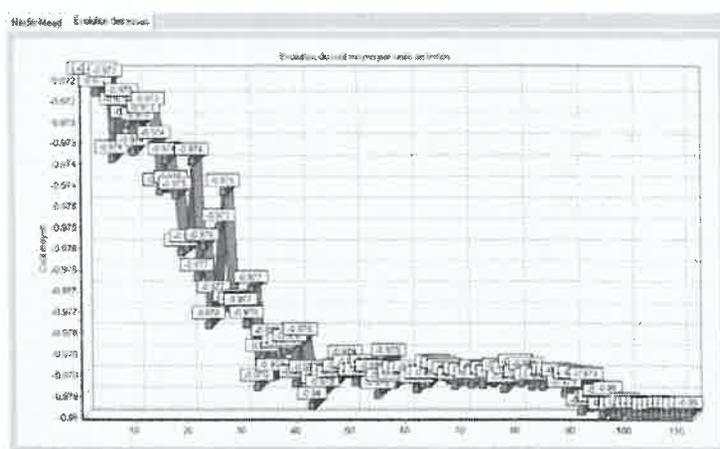


Figure 6 : Convergence de l'optimisation.

Le tableau 3 présente les paramètres optimisés de la stratégie MBRP pour une minimisation du coût. Il apparaît que les deux premières machines sont maintenues préventivement à des temps légèrement inférieurs à leurs MTBF, et que leurs limites d'âge sont de l'ordre de 60% de leurs MTBF respectifs. D'autre part les composants évoluant en parallèle ont des périodicités de maintenance sensiblement identiques, seuls les seuils b distinguent les deux branches. Ces éléments redondants sont remplacés préventivement à des temps de l'ordre de 3/4 de leurs MTBF respectifs.

Équipement	T [h]	B [h]
Poste 1	8798	6281
Poste 2	7731	5083
Poste 3a	2137	1572
Poste 4a	4200	2260
Poste 3b	2195	1166
Poste 4b	4302	2908

Tableau 3 : Temps de maintenance pour une optimisation du coût : stratégie MBRP.

Les résultats de cette optimisation sont à confronter à la structure du système. En effet, le couple poste 3/poste 4 est doublé (redondance active); il semble dès lors logique que les paramètres issus de l'optimisation soient équivalents pour chacune des branches. D'autre part, les postes 1 et 2 sont des points critiques car ils sont en série et leurs états s'appliquent par conséquent immédiatement au système. Il est donc préférable de les maintenir préventivement pour limiter l'indisponibilité globale. Les temps obtenus, qui semblent cohérents, doivent maintenant être opposés aux autres résultats de l'optimisation lors de la phase d'évaluation.

4.3 Évaluation des différentes stratégies

La plate-forme OPTIMAIN permet de comparer les performances des différentes stratégies. Le tableau 4 reprend les coûts et disponibilités pour une maintenance corrective, pour les quatre stratégies préventives implémentées avec période T égale au MTBF de chaque composant et finalement pour ces quatre mêmes stratégies avec des périodes T multiples entre les différents composants. Notons que les seconds paramètres b et n des stratégies MBRP et opportuniste valent respectivement deux tiers de T et de N pour chacun des cas considérés. Quant aux périodes de maintenance préventive multiples l'une de l'autre, les valeurs retenues

sont les suivantes : poste 1 : $T=10000$ h ; poste 2 : $T=7500$ h ; poste 3 : $T=2500$ h ; poste 4 : $T=5000$ h.

Notons que ces valeurs ont été choisies pour une première évaluation, avant d'affiner l'étude. D'après les données du tableau 4, la stratégie âge et la maintenance corrective obtiennent des résultats assez proches, avec un coût horaire légèrement supérieur pour la stratégie âge, mais avec un écart-type inférieur ce qui rend ses performances plus fiables. Les autres stratégies ont des coûts horaires bien plus élevés, même si elles profitent beaucoup de la multiplicité des temps de maintenance. Au vu de ces résultats, il est légitime de se demander s'il est nécessaire de s'orienter vers une maintenance préventive systématique si les résultats ne sont pas notablement améliorés. Mais il faut prendre garde aux risques inhérents à une maintenance corrective : usure prématurée des machines, risque de bris ou de pannes non limitées à un seul mode de défaillance, etc. En conséquence, l'étude présente trouve un intérêt dans l'estimation de la différence de performance entre les résultats du correctif et du préventif. Nous reviendrons sur ces considérations dans la conclusion de l'étude, et nous nous restreindrons maintenant à l'analyse de la maintenance préventive systématique.

Stratégie	Coût [€/h]	Écart-type [€/h]	Disponibilité [%]	Écart-type [%]
Correctif	94.17	2.99	98.19	0.06
Bloc (MTBF)	158.93	3.21	97.24	0.05
Âge (MTBF)	94.24	2.09	98.24	0.05
MBRP (MTBF)	117.36	2.94	98.05	0.06
Opportuniste (MTBF)	216.96	10.48	98.33	0.04
Bloc (mult.)	125.16	3.94	98.01	0.06
Âge (mult.)	95.89	2.13	98.23	0.04
MBRP (mult.)	112.47	2.54	98.11	0.03
Opportuniste (mult.)	199.12	17.03	98.26	0.03

Tableau 4 : Performances initiales du correctif et des différentes stratégies de maintenance.

La stratégie âge, comme dit ci-dessus, obtient le meilleur coût horaire. La stratégie MBRP suit, et les deux autres stratégies ont des performances très faibles en comparaison. Les tests de maintenance effectués avec des temps de maintenance multiples entre eux améliorent grandement les stratégies les moins bonnes en termes de coût. Cela se comprend aisément de par les économies d'échelle que cela engendre. Mais cette amélioration ne suffit pas à combler la différence avec la stratégie âge ou même MBRP. Enfin, l'écart-type pour chacune des lignes de résultats, excepté la stratégie opportuniste, est relativement faible (de l'ordre de 2-3%) ce qui valide la stabilité des évaluations, et confirme l'inutilité de la stratégie opportuniste dans notre cas.

Une fois cet ordre de grandeur obtenu, nous pouvons maintenant effectuer l'analyse fine se basant sur les paramètres optimisés des stratégies de maintenance. Nous nous limiterons pour ce cas-ci à l'application de la même stratégie pour chacun des composants, afin de clarifier nos propos.

Le tableau 5 reprend les résultats des stratégies optimisées minimisant les coûts, tandis que le tableau 6 expose les performances de ces dernières après maximisation de la disponibilité.

Stratégie	Coût [€/h]	Écart-type [€/h]	Disponibilité [%]	Écart-type [%]
Bloc	103.9	2.49	98.44	0.06
Âge	93.62	1.62	98.31	0.04
MBRP	94.68	2.51	98.51	0.06
Opportuniste	105.43	5.63	98.13	0.05

Tableau 5 : Performances des stratégies optimisées minimisant le coût.

On constate une faible variabilité des valeurs concernant la stratégie âge (les plus faibles écarts-types). L'optimisation de cette dernière fournit des paramètres assez proches des précédents, pour un résultat qui l'est tout autant. La stratégie MBRP profite énormément de l'optimisation, puisque le coût horaire est à 1€ près celui de la stratégie âge, avec toutefois un écart-type plus important. Les stratégies bloc et opportuniste voient leurs performances augmenter significativement, mais ces dernières restent inférieures aux deux stratégies précédentes. Au vu de ces résultats, la stratégie de maintenance systématique de type âge est la meilleure en terme de coût horaire.

La disponibilité n'est pas dans notre étude un facteur important de décision. Dans tous les tableaux, la variation de disponibilité est infime et même son optimisation (tableau 6) ne se démarque pas notablement. On peut donc légitimement conclure que le gestionnaire ne doit pas prendre en compte ce facteur. La redondance active des modes de défaillance à la plus courte durée de vie permet de stabiliser significativement le système, ce qui permet de se concentrer sur l'étude des coûts horaires.

Stratégie	Coût [€/h]	Écart-type [€/h]	Disponibilité [%]	Écart-type [%]
Bloc	105.93	4.2	98.4	0.07
Âge	102.04	2.16	98.36	0.05
MBRP	95.99	2.64	98.54	0.05
Opportuniste	167.66	5.29	98.38	0.06

Tableau 6 : Performances des stratégies optimisées maximisant la disponibilité.

5. Conclusion

Nous avons présenté une plate-forme d'élaboration de la stratégie de maintenance appelée OPTIMAIN. Cette plateforme, centrée sur un moteur de simulation, permet la modélisation d'un système complexe à l'aide d'un langage graphique de type diagramme de blocs. Cette modélisation repose sur des données intrinsèques ou prévisionnelles caractérisant chacun des composants du système étudié, à partir desquelles la plate-forme peut simuler le comportement global du système. Cela permet, grâce au couplage de la simulation et de l'optimisation, d'évaluer en premier lieu l'éventuelle stratégie de maintenance et le cas échéant de la comparer à d'autres, ou simplement de tester diverses stratégies en vue d'une implémentation sur site. L'exploitation de la plateforme constitue dans ce sens une réelle aide à la décision pour le gestionnaire de la maintenance.

Nous avons illustré notre propos par une étude de cas. Cette étude montre d'une part une meilleure performance de la stratégie âge. D'autre part, la maintenance corrective aboutit à des résultats presque équivalents. Toutefois, des éléments importants concernant le correctif ne sont pas pris en compte car ils sont difficilement évaluable : usure accélérée des machines non entretenues, risque accru de pannes majeures impliquant plusieurs modes de défaillance, etc. En

conséquence, il apparaît qu'une maintenance préventive basée sur la stratégie âge apportera une légère amélioration quantifiée en termes de coûts horaires à laquelle s'ajoutera une amélioration non quantifiable en termes d'état général de l'outil de production.

Il est à noter que différentes optiques d'analyse existent. Notamment, il est possible d'effectuer l'analyse complète (optimisation de toutes les stratégies) séparément sur chacun des composants, puis d'optimiser le système en ne sélectionnant pour chaque composant que la meilleure stratégie. La méthode est générique pour tous les systèmes, son application varie quelque peu selon les cas d'études.

Afin d'améliorer la plate-forme OPTIMAIN, de nouvelles stratégies plus complexes doivent être intégrées. Ainsi doivent s'ajouter les stratégies de groupe, indispensables pour l'exploitation de systèmes particulièrement volumineux en termes de modes de défaillance, ou encore les stratégies de remplacement par des équipements usagés. L'optimisation multicritère est également un objectif important à atteindre. L'aide à la décision passant par une connaissance des nombreux compromis possibles, l'utilisation de deux critères seulement (coût ou disponibilité) paraît peu satisfaisante.

Remerciements

Nous remercions la Direction Générale des Technologies, de la Recherche et de l'Énergie de la Région Wallonne pour l'intérêt qu'elle porte au projet OPTIMAIN et pour son financement.

6. Bibliographie

- Barlow, R., Proschan, F., (1965), *Mathematical Theory of Reliability*, John Wiley and Sons.
- Basile, O., Dehombreux, P., Riane, F., (2004), "Identification of reliability models for non repairable and repairable systems with small samples", *Proceeding of the IMS'2004, Advances in Maintenance and Modeling, Simulation and Intelligent Monitoring of Degradation*, Arles.
- Jamali, M.A., Roux, O., Ait-Kadi, D., Artiba, A., (2004), « Intégration des algorithmes d'optimisation et des méthodes de simulation pour l'analyse de stratégies de maintenance des systèmes sujets à des défaillances aléatoires », *Proceeding of JTEA 2004*, Tunisie.
- Luersen, M.A., Le Riche, R., Guyon, F., (2003), "A constrained, globalized and bounded Nelder-Mead method for engineering optimization", Springer-Verlag.
- Lust, T., Riane, F., Roux, O., (2005a), « Plateforme de modélisation, de simulation et d'optimisation des actions de maintenance d'un système multi-composants », *Proceeding of Qualita 2005, Qualité et Sécurité de Fonctionnement*, Bordeaux.
- Lust, T., Riane, F., Roux, O., Dehombreux, P., (2005b), "Simulation-based framework for maintenance optimization", *Proceeding of Industrial Simulation Conference 2005*, Berlin.

- Marseguerra, M., Zio, E., (2002), "Optimizing maintenance and repair policies via a combination of genetic algorithms and Monte Carlo simulation", *Reliability Engineering and System Safety*, n°68, pp. 69-83.
- McCall, J., (1965), "Maintenance policies for stochastically failing equipment: a survey", *Management Sciences*, n°11, pp. 493-524.
- Nakagawa, T., (1979), "Optimum policies when preventive maintenance is imperfect", *IEEE Transactions on Reliability*, n°R-28 4, pp. 331-332.
- Nelder, J.A., Mead, R., (1965), "A simplex method for function minimization", *The Computer Journal*, n°7, pp. 308-313.
- Roux, O., Riane, F., Bardey, D., (2005), "A risk-cost based preventive maintenance policy", *Proceeding of IESM'05, International Conference on Industrial Engineering and Systems Management, Marrakech*.
- Vergin, R., Scriabin, M., (1979), "Maintenance scheduling for multicomponent equipment", *AIIE Transactions*, n°9, pp. 297-305.
- Wang, H., (2002), "A survey of maintenance policies of deteriorating systems", *European Journal of Operating Research*, n°139, pp. 469-489.