L'intégration des Activités de Maintenance dans la Conception des Systèmes d'Automatisation

Ziad Imam

▶ **To cite this version:**

Ziad Imam. L'intégration des Activités de Maintenance dans la Conception des Systèmes d'Automatisation. Automatique / Robotique. Université de Lille 1 - Sciences et Technologies, 2015. Français. NNT : . tel-01742028

HAL Id: tel-01742028
https://hal.science/tel-01742028

Submitted on 23 Mar 2018

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.

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Université Lille 1

Centre de Recherche en Informatique,
Signal et Automatique de Lille
UMR 9189
Ecole Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur
EDSPI 072

THESE DE DOCTORAT

Présentée par

Ziad IMAM

Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université de Lille1
Spécialité Automatique et Informatique Industrielle

L'intégration des Activités de Maintenance dans la Conception des Systèmes d'Automatisation

Thèse soutenue le 24/06/2015 devant le jury composé de :

M.	Jean Marc THIRIET	Professeur	Université Joseph Fourier Grenoble	(Rapporteur)
M.	Ghaleb HOBLOS	EC-HDR	ESIGELEC - IRSEEM	(Rapporteur)
M.	Abdessamad KOBI	Professeur	Université d'Angers	(Examinateur)
Mme.	Mireille BAYART	Professeur	Université Lille1	(Directrice)
M.	Blaise CONRARD	MCF	Polytech'Lille	(Co-Encadrant)

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

À mes parents,
ils sauront pourquoi ..

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Remerciements

Je voudrais tout d'abord exprimer mes plus profonds remerciements à mes directeurs de thèse, Madame Mireille BAYART, et Monsieur Blaise CONRARD pour la confiance qu'ils m'ont accordée en acceptant d'encadrer ce travail de recherche, pour leurs multiples conseils et pour toutes les heures qu'ils ont consacrées à diriger cette étude doctorale. J'ai été extrêmement sensible à leurs qualités d'écoute et de compréhension tout au long de ce travail. Je les remercie également pour m'avoir appris à être plus autonome tout au long de ce travail de thèse que je n'aurais jamais pu réaliser sans leur soutien.

Je souhaiterai aussi adresser ma gratitude aux autres professeurs qui s'occupent des différentes activités du laboratoires. Et j'adresse aussi mes remerciements aux personnes qui travaillent directement et indirectement en faveur des doctorants que cela soit au laboratoire, à l'université ou à l'école doctorale.

Je tiens également à remercier ma famille, mes collègues, mes amis pour leur soutien et leurs affections.

Villeneuve d'Ascq, le 24 juin 2015.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Table des matières

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Liste des figures

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Préface

Les systèmes industriels, et donc les équipements qui leurs sont associés, exigent de plus en plus de disponibilité, de sécurité et de performance ; ce fait impose d'améliorer les bases de recherche liées à l'ingénierie de fiabilité et de bien gérer les ressources de la sûreté de fonctionnement. L'ingénierie de fiabilité a évolué trop vite dans tous les secteurs scientifiques et dans les applications techniques dans les processus industriels ; ce développement a été réalisé à partir des les données pratiques et théoriques grâce auxquelles on peut estimer la capacité des systèmes, produits ou composants ; ceci permet d'expertiser les performances requises pour assurer les fonctions pour lesquelles les systèmes seront conçus.

La fiabilité est une branche capitale de l'ingénierie de "performabilité" (B.Misra K, 2008) qui peut être définie comme toutes les activités d'ingénierie qui visent à améliorer la performance des systèmes, la qualité, la fiabilité, la maintenabilité et la sécurité ; mais également, d'assurer la durabilité de ces différentes propriétés et de minimiser les coûts pendant la durée de vie des systèmes.

Pratiquement aujourd'hui, les équipements industriels automatisés sont l'acteur unique dans la section industrielle ; on enchaîne des opérations successives continues, et on dépend des systèmes qui peuvent être restaurés rapidement et totalement après les pannes ; où le temps des opérations de maintenance est un grand acteur dans la stabilité de leur durée de vie utile. Ceci rend important d'avoir un système fiable et "maintenable", en particulier lorsqu'on considère des systèmes industriels conçus pour un niveau de compétitivité assez considérable. Ces systèmes doivent utiliser des technologies de production comme l'informatique, les équipements de communication, la commande numérique, etc. Systématiquement, on aura des produits de haute technologie, des systèmes à haute disponibilité, mais en même temps, il ne faut pas compromettre les coûts de production et de fabrication, ce qui impose à la recherche d'obtenir des solutions d'optimisation de fiabilité des systèmes et de maintenance. Les coûts de maintenance et de maintenabilité sont une fonction directe de la fréquence de la maintenance, et de l'intervalle entre pannes dans les systèmes complexes compétitifs ; il est intéressant de mentionner que ces coûts dépassent les 65% des coûts globaux du cycle de vie de tels systèmes (Dhillon, B.S, 2006).

Conception qui satisfait un objectif de maintenance

La conception de ces systèmes complexes doit être maîtrisée, organisée et doit comprendre l'esprit d'innovation (au niveau des bases de la modélisation et des raisonnements des processus de conception). Cela représente

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

à la base, l'ensemble des techniques appliquées à l'analyse de la relation produit-usage ; ces techniques sont liées à la fabrication et elles assurent des solutions applicables. La prise en compte de la maintenabilité et de la fiabilité d'un système dès la phase de la conception, permet d'envisager de diminuer les coûts de cycle de vie, et d'assurer la disponibilité des système. Aujourd'hui, le design récent et la conception avancée, des équipements et des systèmes industriels automatisés, sont des clés importantes pour assurer le succès et la compétitivité dans le marché d'industrie. Cela consiste en la réalisation du bon produit, pour le bon marché, au bon prix, au bon moment du besoin et de la demande au niveau du marché ; tout en considérant un bon niveau de fiabilité et de qualité du produit (Levett et al. 2010). On peut affirmer que la conception d'un système est meilleure, si la durée de vie utile de ce système est plus longue, si le système a un niveau haut de fiabilité, un niveau d'apparence attractive et si les coûts de production et de maintenance du produit ne sont pas trop élevés ; et plusieurs autres raisons peuvent être donner un système des spécifications de qualité. Mais aussi, on considère la conception comme satisfaisante si et seulement si on a assuré la fiabilité du produit conçu, qui est un facteur décisif dans la conception et l'ingénierie industrielle. Cela va conduire à un produit assez complexe, sécurisé, mais peut être coûteux.

Pour tenter de réduire les risques de tomber en panne à un niveau le plus bas possible et acceptable, des méthodes, des techniques et des outils scientifiques, à partir de la phase de la conception, ont été développés pour évaluer les risques potentiels, prévoir l'occurrence des défaillances et minimiser les conséquences des situations catastrophiques. Il est donc indispensable de disposer des outils capables d'assurer un haut niveau de la sûreté de ces équipements.

L'amélioration de la fiabilité en phase de conception porte plusieurs buts, cela vise dans l'ensemble à perfectionner la vie utile d'une entité, et à réduire les coûts de construction et d'exploitation. Deux approches d'analyses sont utilisées dans la recherche qui concerne la fiabilité, une approche quantitative, qui vise à calculer la fiabilité à partir du nombre des défaillances observées pendant une durée de temps définie, prévoir la fiabilité à partir des méthodes probabilistes telles que (Boole, Markov, ADD, etc.) ; et une approche qualitative, qui vise à évaluer systématiquement les effets des défaillances, la gravité et l'intensité à l'aide de méthodes telles que (AMDEC, ADD, etc.) utilisées souvent lorsque les taux de défaillances ne sont pas disponibles. Les procédures actuelles de conception des systèmes d'automatisation sont orientées vers la considération de la maintenance comme une fonction, et pas une option dans les démarches de conception ; et cela nous guide à l'ingénierie de maintenabilité qui est, dès la phase de conception, forte essentielle pour assurer une disponibilité optimale de fonctionnement des systèmes. Les calculs de disponibilité, par ailleurs, dépendent du temps d'arrêt du système, ce qui est le temps nécessaire pour revenir à l'état opérationnel du système ; le temps d'arrêt est toujours affecté par le nombre d'interventions pour maintenance et le nombre des défaillances, ce qui impose l'importance de prendre en compte les caractéristiques de maintenabilité, et cela est possible à réaliser dans la phase de conception, par la validation de l'évaluation de maintenabilité et l'application des exigences et des concepts spécifiques de conception.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Une autre considération dès la phase de conception a eu tendance à être beaucoup plus prise en compte : c'est la fiabilité qui sera expérimentée pour satisfaire les exigences et les spécifications définies ; mais aussi pour assurer le maximum de perfectionnement de la mission fournie par le système. La conception orientée fiabilité décrit l'ensemble des outils et des techniques qui supportent le processus de conception pour rassurer la durée de vie du produit conçu. Il est impératif ici de comprendre le mécanisme de défaillance, pourquoi elle est arrivée ? À quel niveau de structure ? À quel moment de la mission ? Pendant combien de temps le système reste en arrêt ? Mais ensuite, comment éliminer ou au moins réduire les facteurs qui provoquent la défaillance ? Comment augmenter la résistance des éléments concernés afin qu'ils soient capable d'effectuer un service requis ?

Dans certains processus de conception traditionnelle avec objectif de fiabilité, on ignore que la fiabilité des systèmes varie au cours du temps. Ce fait provoque des opportunités d'avoir des états de dysfonctionnement qui, dans la plupart des cas, vont générer des défaillances soudaines.

Généralement les procédures de conception commencent par le cahier des charges, avec des objectifs qui concernent la fiabilité, mais également les coûts, la performance, l'efficacité ou bien comme dans notre étude, la conception pour objectif de maintenance et fiabilité.

Plus de performance

La maintenance préventive peut être définie par l'ensemble des tâches effectuées contre les causes des défaillances potentielles dans la vie d'un système, sous-système, ou un élément. Ces tâches de maintenance peuvent retarder le processus de détérioration des systèmes réparables, et restaurer les systèmes dans un meilleur état. Cela consiste en une activité qui a pour but d'améliorer la fiabilité générale et la disponibilité d'un système, mais aussi de réduire le taux des défaillances, et indirectement, les coûts de cycle de vie du système, qui peuvent contenir les coûts de réparation, arrêt de production et de qualité perdue suite à une dégradation de performance ou une dégradation matérielle.

La fiabilité, qui est un indice de la performance et de la conformité du système, est une grandeur qui se dégrade au fil du temps selon la durée et la fréquence d'utilisation du système ; afin de maintenir cette performance à un niveau souhaité, des opérations de maintenance préventive seront nécessaires à réaliser pendant la durée de vie utile d'un tel système. Par ailleurs, les défaillances auront parfois des conséquences catastrophiques qui provoquent un arrêt complet et soudain du système, ce qui est dangereux et coûteux ; et d'autre fois, les défaillances évoluent progressivement faisant une détérioration de performance de système ; dans les deux cas, il est important de faire un compromis entre la performance fournie par les composants et les coûts de leur maintenance qui augmentent évidemment avec l'âge et la complexité des défaillances ; et cela sera efficace d'avoir la capacité de déterminer si certains composants doivent être remplacés et de déterminer leur date de remplacement. Ces démarches sont plutôt compliquées, lorsque le but est d'effectuer le bon choix, et de faire un équilibre entre l'effort de maintenance à effectuer et les autres bénéfices.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Besoin d'optimisation de maintenance

Dans le secteur industriel, l'optimisation de la maintenance est basée sur des informations de la fiabilité d'équipements et une politique de maintenance adaptée ; les applications de ces politiques montrent une grande amélioration dans la performance des systèmes industriels au niveau de (Coûts, Qualité et Temps).

Les informations qui peuvent aider à établir le meilleur choix d'opération de maintenance, sont toujours acquises après des analyses qui permettent de connaître le besoin d'une intervention, et à quel moment précis on doit la réaliser. Lorsqu'un élément se rapproche de la fin de sa vie, on s'attend à avoir besoin de plus de maintenance, ce qui coûte plus au niveau de travail, nouvelles pièces, qualité et temps d'arrêt. Aucune action préventive ne semble utile à être réalisée si ses coûts n'étaient pas moins importants que les coûts de défaillances et d'arrêt ; l'efficacité d'une intervention peut être justifiée par une simple analyse des conséquences des défaillances possibles du système. Les opérations de maintenance adéquates effectuées au moment approprié permettent aux systèmes de détenir une meilleure fiabilité ; et elles sont des moyens efficaces pour prolonger leur durée de vie.

Tout système possède un cycle de vie qui passe normalement par trois étapes : une période de taux de défaillances décroissants, une période de taux de défaillances constants et une période des taux de défaillances croissants. Cette dernière, généralement, est la plus critique et représente le vieillissement ou l'usure du système, où la fréquence des défaillances augmente au cours du temps.

L'objectif de cette thèse s'articule autour de la prise en compte des processus de maintenance dès la phase de conception des systèmes ; la performance des produits conçus sera donc assurée et sécurisée tout au long de l'exploitation ; mais aussi, le temps perdu pour la maintenance et les coûts de maintenance seront considérablement diminués. Cela consiste en la recherche de techniques qui visent à faciliter l'accès aux éléments susceptibles d'être maintenus à une certaine fréquence, déterminer l'architecture et la structure du système capable de réaliser sa mission avec le meilleur rapport de fiabilité-coûts, il s'agit de l'architecture optimale pour des critères de maintenabilité ; de plus, et pour chaque intervention pour la maintenance, déterminer les meilleures actions de maintenance à effectuer pour atteindre ce niveau voulu de sûreté avec des frais moindres de maintenance, pour objectif, finalement, de réussir la mission pour laquelle le système a été conçu. En respectant un certain niveau de sûreté de fonctionnement d'un système, un maximum d'économie peut être effectué à l'aide d'une méthodologie de détermination des actions optimales de maintenance, et qui sont capables, si appliquées, de garder le système en état de bon fonctionnement jusqu'à la date de fin de sa mission. Une deuxième étape est de déterminer l'architecture optimale du système d'automatisation, la structure capable d'apporter le maximum de sûreté et le maximum d'économie des coûts de maintenance. Pour cela, le système étudié est censé être représenté graphiquement par un moyen qui permet de mettre en évidence les corrélations entre causes et effets.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Grâce à l'enchaînement d'évènements ou les scénarios possibles des états de dysfonctionnement, un traitement mathématique des combinaisons d'évènements peut conduire à évaluer les probabilités d'occurrence ; et donc la probabilité d'apparition de défaillance du système qui nous permet de comparer la fiabilité du système à une valeur référence.

Contribution

Il est indispensable dans toute activité d'optimisation de maintenance de trouver des solutions qui organisent le processus en général ; aucune opération de maintenance n'est efficace si l'élément maintenu possède encore la capacité de fournir un effort à la date d'intervention. Autrement dit, si l'équipe de maintenance est censée examiner tous les éléments d'un système ou un sous-système en état de dysfonctionnement, cela ne rend pas la maintenance préventive effectuée comme une action utile ; et le fait d'agir rapidement et de juger l'état d'un des composants comme mauvais, alors qu'il possède encore la capacité de fournir le service, n'est pas une bonne solution pour gagner du temps lors de la maintenance ni pour augmenter la disponibilité et la sûreté du système. Surtout, lorsque le technicien de maintenance doit réagir directement sur les éléments concernés et pour un objectif contraint du temps représenté par une mission à exécuter pendant deux instants définis. La méthodologie proposée dans la thèse est capable, à tout moment d'intervention, de fournir la solution optimale à adopter dans une opération de maintenance. Étant optimale, la solution fournie est une combinaison des actions de maintenance à effectuer. Une conception d'architecture basée sur cette méthodologie d'optimisation, représente efficacement une réponse à notre question de recherche autour de la conception pour objectif de maintenance et fiabilité.

Plan et organisation du mémoire

La thèse a été élaborée à l'université de Lille 1 de sciences et technologies ; au laboratoire d'automatique, génie informatique et signal LAGIS UMR CNRS 8219 (Ce laboratoire a été regroupé récemment avec le laboratoire LIFL laboratoire d'informatique fondamentale de Lille pour constituer le laboratoire CRIStAL). LAGIS est un laboratoire lié à l'université de Lille 1, l'école centrale de Lille et principalement l'institut INS2I du CNRS. C'est un laboratoire qui regroupe environ 180 personnes dont quasiment 85 doctorants de toutes activités du traitement de l'information et de conception des systèmes. Les chercheurs sont répartis dans cinq équipes de recherche : l'équipe (MOCIS) Méthodes et Outils pour la Conception Intégrée de Systèmes, qui se base sur la conception intégrée des systèmes automatisés à l'aide des représentations de Bond Graph. L'équipe (OSL) Optimisation des Systèmes Logistiques, qui vise à développer des modèles et des méthodes d'optimisation qui permet de fournir une aide à la décision lors de la gestion des systèmes logistiques. L'équipe (SI) Signal et Image, qui s'intéresse à la transmission d'information via des codes graphiques. L'équipe (SyNeR) Systèmes Non-linéaires et à Retards, qui étudie des nouvelles méthodes et des outils dans le domaine du contrôle commande et de la théorie des systèmes. Et enfin l'équipe (STF)

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Systèmes Tolérants aux Fautes, l'équipe à laquelle j'appartiens, et qui développe des méthodes capables de rendre les systèmes traités comme systèmes tolérants aux fautes qui garantissent un niveau souhaité de sûreté de fonctionnement, et qui sont capables de fournir leur missions malgré les défaillances de certains de leurs composants. Les applications sont souvent des systèmes de transport ou énergie, systèmes de production et de services ou bien des systèmes qui concernent l'ingénierie pour la santé.

Ce mémoire, destiné aux concepteurs cherchant à optimiser la disponibilité de leurs produits, est construit en une seule structure de quatre chapitres, le **premier chapitre** est un exposé descriptif des termes et des points d'intérêt de la sûreté de fonctionnement, une description plus détaillée de la science des défaillances et les notions associées pour finir par les stratégies de maintenance et de ses modèles. Étant un ingénieur chercheur issus de formation génie mécanique, j'ai souhaité détailler ce chapitre, et il était indispensable de représenter ces notions d'une manière qui les clarifie et qui permette d'atteindre un objectif voulu. Un **deuxième chapitre** est constitué à la définition de la problématique de recherche, et la littérature réalisée sur l'optimisation de maintenance multi-objectifs et la conception pour objectif de maintenance ; une description du problème de la thèse est présentée en expliquant les hypothèses et les conditions nécessaires. Le **troisième chapitre** définit en détails le contexte de la méthode ; une présentation du modèle du système est fournie dans un premier temps ; puis on spécialise la discussion pour les étapes de la méthode de détermination des actions de maintenance. Alors que **le chapitre quatre** est consacré aux applications industrielles qui soulèvent la même problématique et qui nécessitent une solution d'optimisation ; un exemple industriel a été examiné pour déterminer les actions optimales, et de se baser sur ces dernières pour obtenir l'architecture optimale du système d'automatisation.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

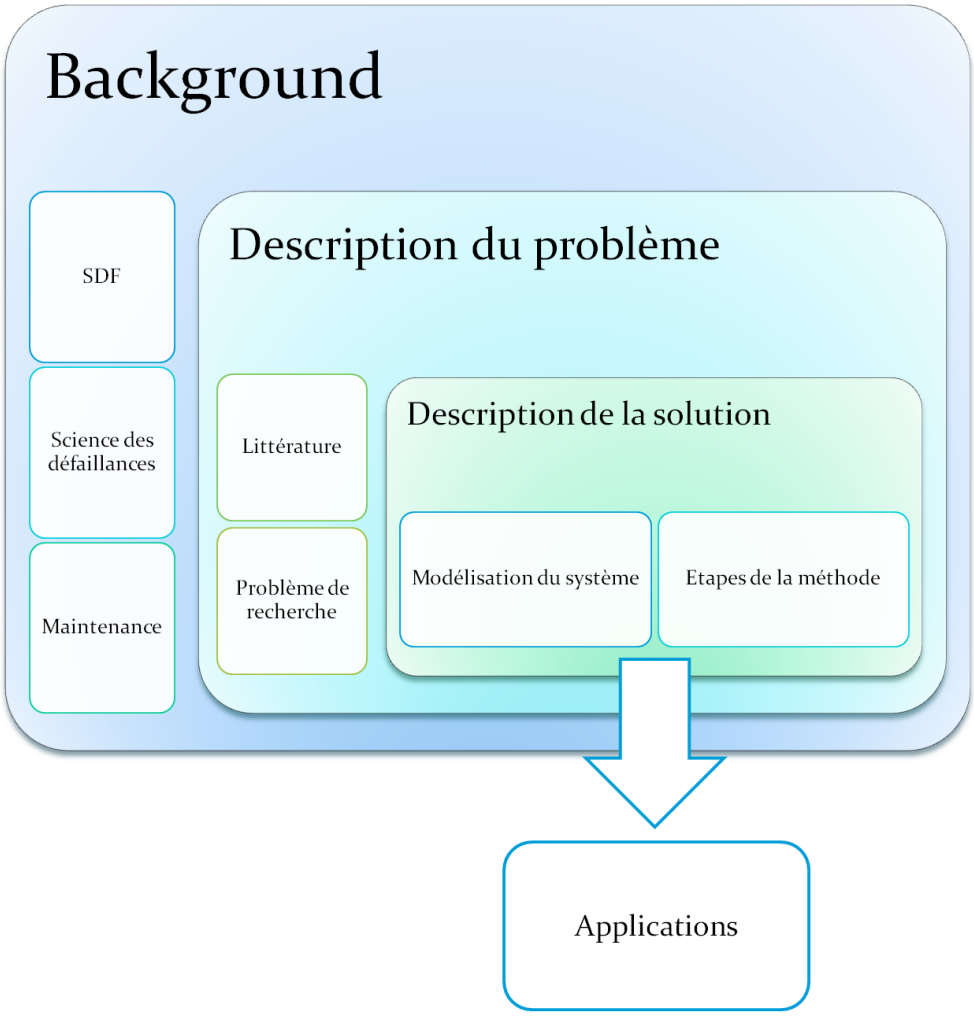


FIGURE 1 – *Structure du mémoire*

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Background

1

Sommaire

Ce chapitre introduit l'ingénierie de fiabilité et présente dans la première section les notions de système. Les sections qui suivent sont consacrées à une introduction à la sûreté de fonctionnement, aux notions de défaillances, la maintenance et aux modèles d'optimisation de la maintenance préventive, et les politiques de remplacement terminent ce chapitre.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

1.1 Définitions et Terminologie

Plusieurs termes techniques sont utilisés dans l'ingénierie de fiabilité représentée par ses deux concepts scientifique et académique ; ce chapitre présente, à partir de plusieurs sources (B.S. Dhillon 1999 ; Dummer et al. 1997 ; Zwingelstein 1996 ; Limbourg 2008), les concepts fondamentaux et les définitions qui sont utilisées le plus fréquemment dans la caractérisation de la sûreté de fonctionnement dans le but d'acquérir les connaissances nécessaires et d'observer les points de vue différents sur ce sujet.

1. Procédé industriel (*Industrial process*) : Un procédé industriel assure une fonction, un service ou la fabrication d'un produit. En privilégiant les concepts, on appellera processus industriel, une installation complexe assumant un objectif fonctionnel de haut niveau, et pour ce fait le processus fait appel à un ensemble de systèmes interconnectés, chaque système assure une ou plusieurs fonctions définies.
2. Système (*System*) : Un système est un ensemble de composants destiné à accomplir ou remplir une fonction générale requise. C'est une entité qui interagit ou qui dialogue avec d'autres entités ; le système peut être composé d'un ensemble de sous-systèmes. Un système est conçu pour une fonction donnée ; c'est la structure du système qui lui permet de réaliser une fonction définie ou de délivrer un service perçu par l'utilisateur. Le comportement d'un système peut être décrit par une équation du type $Y = f(X)$ comme illustré dans la (Fig. 1.1) . On distingue le comportement prédéfini ou souhaité d'un système, le comportement actuel ou observé.

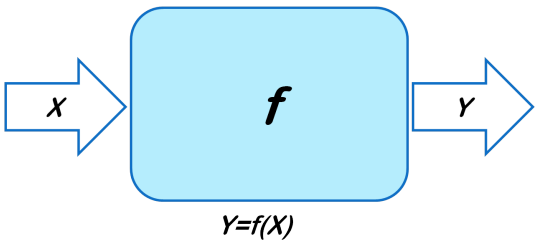


Figure 1.1 – *Comportement d'un système*

3. Sous-système (*Sub-system*) : Un ensemble de composants destiné à remplir une ou plusieurs fonctions opérationnelles. Les sous-systèmes doivent fonctionner en cohérence et synchronisation pour atteindre l'objectif fonctionnel du système qui les contient. Dans la (Fig. 1.2), la structure d'un système est illustrée.
4. Ensemble (*Assembly*) : Certains sous-systèmes peuvent être décomposés en sous-systèmes de niveau inférieur, dans ce cas on les appelle des ensembles. Par exemple une voiture représente un système et le moteur est un sous-système ; mais dans le moteur lui-même,

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

on appelle le circuit de refroidissement, ou le circuit d'allumage, un ensemble. Le fonctionnement en cohérence est aussi indispensable pour un ensemble.

5. Composant (*Component*) : Le composant représente un élément matériel ou un ensemble matériel choisi pour remplir une fonction particulière dans un système ou dans un sous-système. Le composant n'est plus décomposé à des niveaux inférieurs. Un composant peut être réparable ou non-réparable. Dans d'autres références il est appelé une entité, un élément ou une pièce.

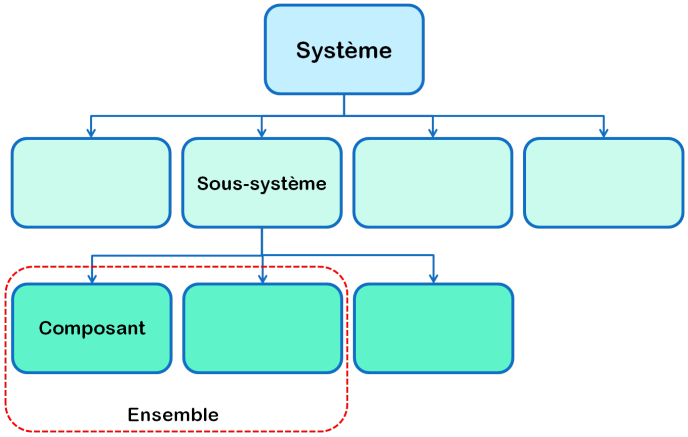


FIGURE 1.2 – *Structure du système*

Selon les comportements souhaités du système, et en fonction de la mission pour laquelle le système est conçu, les composants du système seront disposés dans une structure qui permet d'atteindre les objectifs de fonctionnement et de fournir cette mission avec les spécifications souhaitées. Les configurations de cette structure concernent principalement la manière dont les composants sont placés et interconnectés ; la figure suivante (Fig. 1.3) présente des différents schémas de base des structures de systèmes :

- En parallèle : $sys = parallèle(sys_1, ..., sys_n) = sys_1 \vee sys_2 \vee ... \vee sys_n$
- En série : $sys = série(sys_1, ..., sys_n) = sys_1 \wedge sys_2 \wedge ... \wedge sys_n$
- Et combinés ou mixtes ou complexe.

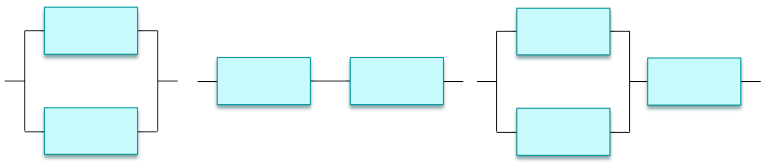


FIGURE 1.3 – *Système en parallèle, en série et combiné*

Le placement des composants dans une structure redondante permet d'améliorer la performance du système et améliorer sa capacité à fournir la mission malgré certains défauts. Néanmoins cette capacité a des limites lorsqu'on affronte un certain nombre de défauts m.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Un système tolérant aux fautes nécessite r composants en bon état de fonctionnement pour assurer son objectif ; et il peut donc tolérer jusqu'à $n - r$ défauts, cette configuration de systèmes est appelée un système r/n où le bon fonctionnement du système est assuré lorsqu'au moins r composants sur n sont en bon état de fonctionnement. Dans cette thèse, le développement sera appliqué à un modèle de système r/n. Il est utile de mentionner qu'un système r/n considère le modèle d'un système en série et d'un système en parallèle en même temps comme des cas spéciaux. De plus dans cette thèse, on décrit le dysfonctionnement du système par un modèle qualitatif dans lequel on utilise la description $(n - r + 1)/n$ du système, où $(n - r + 1)$, représente le nombre minimal des pannes pour avoir la défaillance du système global.
Il est impératif de préciser, dans un deuxième temps, qu'un système peut être mis en service comme un système de production S composé de plusieurs éléments qui participent à la production d'un produit, ces éléments englobent l'ensemble des techniques, outils et approches qui permettent aux producteurs d'exploiter les matériels du système dans la plus grande efficacité possible. Mais aussi, un système peut avoir le rôle d'un système de services qui peut être un développement ou un déploiement d'une partie de la production, l'objectif principal d'un tel système est de fournir la mission pour la quelle il est conçu ; la réalisation successive de cette mission B permet de transmettre le produit d'un niveau A antérieur ou inférieur à un niveau C postérieur ou supérieur dans le flux de production.

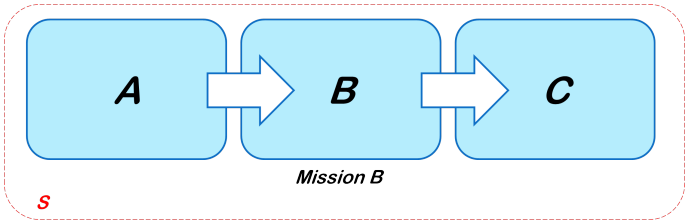


FIGURE 1.4 – *Étape du système de service à base d'une mission*

Dans la figure ci-dessus (Fig. 1.4), on constate directement que si un dysfonctionnement se produit au niveau du système de service, le système de production perd un des services et cela affecte la performance et l'efficacité, ce qui peut générer de mauvaises conséquences ou un arrêt du système ; dans les sections qui suivent, nous allons décrire nos points d'intérêt en ce qui concerne l'état de dysfonctionnement et les défaillances.

6. Anomalie (*Anomaly*) : Comportement non-prévu, ou déviation des comportements attendus.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

7. Dégradation (*Deterioration*) : Une dépréciation graduelle de la performance ou de l'état de la structure matérielle d'un système.
8. Coûts (*Costs*) : Les dépenses nécessaires pour développer, acquérir ou utiliser un produit ou un système pendant une durée définie de temps.
9. Cycle de vie d'un système (*Life cycle*) : C'est la période divisée en phases, allant des premières réflexions sur le besoin pour le système ou pour l'équipement jusqu'à son retrait de service voire son démantèlement, en passant par son développement et son utilisation.
10. Coûts de cycle de vie (*Life cycle costs*) : Dans une stratégie de maintenance, et pour chaque mission, on considère un moyen des dépenses qui prend en compte la maintenance sur tout le cycle de vie de l'équipement ; le coût global de possession d'un matériel (ou le coût de cycle de vie) comprend les coûts d'expérimentation ou d'investissement de l'équipement, les coûts cumulés d'utilisation ou d'exploitation sur l'ensemble de la durée de vie et les coûts de maintenance en fonction d'une politique donnée (Pellegrin, 1997).
11. Redondance (*Redundancy*) : La possibilité d'accomplir une fonction en plusieurs moyens. On appelle "redondance active" lorsque tous les composants redondants fonctionnent simultanément ; et "redondance passive" si les composants redondants sont mis en oeuvre à la demande pour dépasser l'occurrence d'une faute, et empêcher la faute de provoquer des erreurs.

Je précise que l'objectif de la citation de ces notions précédentes est d'avoir une simple idée des termes utilisés dans la thèse, certaines vont être détaillées dans le meilleur emplacement. La section suivante permet de souligner certains points d'intérêt en ce qui concerne la performance et les risques lors du fonctionnement des systèmes

1.2 La Sûreté de Fonctionnement (*Dependability*)

La sûreté de fonctionnement peut être définie comme l'ensemble des aptitudes d'un bien qui lui permettent de remplir la fonction pour laquelle il a été conçu, au moment voulu pendant la durée prévue sans dommage pour lui-même et pour son environnement (Zwingelstein 1995). Selon (DIN 40041 1990) "*A form of availability that has the property of always being available when required. It is the degree to which a system is operable and capable of performing its required function at any randomly chosen time during its specified operating time, provided that the item is available at the start of the period*". La Sûreté de fonctionnement consiste à connaître, évaluer, prévoir, mesurer et maîtriser les défaillances des systèmes technologiques et les défaillances humaines pour éviter ces conséquences (Zwingelstein 1995),

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

elle concerne la relation entre la mission ou le service requis d'un bien et le service observé réellement. Un système qui fournit à son utilisateur un service, selon des spécifications, est un système confiant si on a placé une confiance justifiée dans le service délivré par le système. En revanche, un système est considéré défaillant quand on aura une différence entre le service requis et le service délivré réellement. Cette confiance repose sur un ensemble de démarches, des moyens, des outils, et des méthodes. Elle se caractérise par l'analyse des défaillances et de leurs conséquences et s'exprime par un ensemble de caractéristiques : La fiabilité, La disponibilité, La maintenabilité, La sécurité. L'évolution des modèles de la sûreté de fonctionnement peut être observée de manières différentes (Besnard et al. 2006) :

1. Modèles de tolérance aux fautes : Qui dépend des distributions des défaillances des systèmes, comme par exemple MTTF "*Mean time to failure*" le temps moyen avant défaillance ; l'observation et la surveillance de ces types de grandeurs permettent de caractériser l'évolution de performance des systèmes telle que la capacité de fournir certains services et la capacité de le maintenir.
2. Modèles probabilistes : Qui prédisent comment évaluer la sûreté de fonctionnement selon l'estimation de ses attributs.
3. Modèles structurés : Qui estiment le hasard relié aux défaillances du système et leurs risques, telle que la méthode des arbres des défaillances et la méthode des arbres des causes et l'AMDEC.
4. D'autres modèles : Qui lient les caractéristiques de la sûreté de fonctionnement avec la structure et la fonctionnalité du système et ses processus.

L'évaluation de la sûreté de fonctionnement d'un système peut être considérée d'un niveau élevé, niveau moyen, et niveau bas ; pour mieux préciser ces niveaux, on peut utiliser une échelle de zéro à 100%. L'amélioration de la sûreté de fonctionnement est basée sur des techniques développées par l'ingénierie de fiabilité et qui comprend les moyens suivants :

1. La prévention des fautes : Empêcher l'occurrence des fautes et diminuer la probabilité de leur apparition.
2. La tolérance aux fautes : Diminuer la probabilité des défaillances malgré la présence éventuelle des fautes.
3. L'élimination des fautes : Détecter, identifier et enlever les fautes du système.
4. Prévision des fautes.

Dans le sens large, la sûreté de fonctionnement pour (Villemeur 1988), est la science des défaillances ; elle inclut leur connaissance, leur évaluation, leur prévision, leur mesure et leur maîtrise. L'arbre illustré dans le

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

schéma suivant (Fig. 1.5) présente l'arbre de sûreté de fonctionnement, il est structuré par trois principales branches : les caractéristiques (les attributs), les moyens (les méthodes) et les entraves (les menaces).

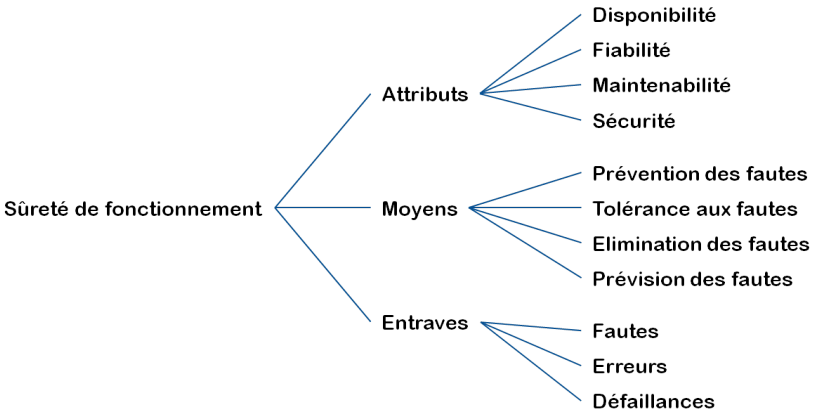


FIGURE 1.5 – *Arbre de sûreté de fonctionnement*

1.2.1 La fiabilité (*Reliability*)

Selon la norme (NF X 60-500), la fiabilité est l'aptitude d'une entité à accomplir une fonction requise, dans des conditions données, pendant un intervalle de temps donné. Selon (ISO 8402) : *The ability of an item to perform a required function, under given environmental and operational conditions and for a stated period of time* (Rausand Hoyland 2004). Le sens de la fiabilité vient de la capacité de savoir combien de temps un élément peut fonctionner avant de tomber en panne ; en d'autres mots, c'est la probabilité d'être performant (pouvoir fournir la fonction requise selon des conditions initiales). Un système est considéré fiable quand il est capable d'être performant dans des conditions d'utilisation prédéfinies et sur un intervalle de temps donné pour accomplir une fonction requise. La construction de la fiabilité des systèmes s'organise sous trois formes, prévisionnelle, expérimentale et opérationnelle (Lyonnet 2006). Ces trois formes consistent à prévoir la fiabilité dès le début de projet à partir d'une analyse qualitative et/ou quantitative et prendre des orientations d'optimisation en matière de conception ; puis à quantifier la fiabilité à partir des essais ou des calculs pour connaître la robustesse de la conception ; enfin à évaluer la fiabilité en service à partir de données du retour d'expérience et corriger les défauts de conception et de processus. D'un point de vue physique (Rausand Hoyland 2004 ; Bertsche 2008), on définit la fiabilité comme la probabilité que les charges appliquées sur une entité ne dépassent pas sa résistance initiale ; une défaillance se produira si les charges dépassent la résistance, comme c'est illustré dans la figure ci-dessous (Fig. 1.6).

$$R(t) = Pr(Résistance < Charges) \tag{1.1}$$

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Les charges appliquées sur une entité varient au cours de temps, et peuvent être modélisées comme un variable dépendant du temps ; la résistance de telle entité est aussi une fonction du temps. Le temps moyen jusqu'à la première défaillance t_f est le temps le plus court avant d'avoir *Résistance(t)* < *Charges(t)*, cela peut être formulé par :

$$t_f = [min(t > 0)|Résistance(t) < Charges(t)] \tag{1.2}$$

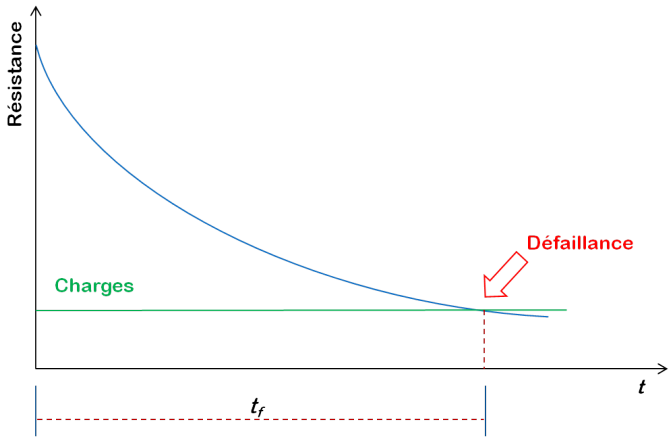


FIGURE 1.6 – *Résistance, charges, défaillance*

D'un point de vue mathématique, la fiabilité est définie par la probabilité qu'une entité soit non défaillante sur une durée prédéfinie $[0, t]$, cela veut dire que l'entité doit être en état de bon fonctionnement à $\tau = t$ sachant qu'elle était en bon état à l'instant d'être mise en service $\tau = 0$; cela représente la période de temps durant laquelle le fonctionnement est assuré. Si on considère t_f une variable aléatoire qui représente le temps jusqu'à la première défaillance (*time to first failure*), et t le temps actuel, nous avons :

$$R(t) = Pr(Système\ non\ défaillant\ à\ \tau = t \mid il\ n'est\ pas\ défaillant\ à\ \tau = 0) \tag{1.3}$$

$$R(t) = Pr(Système\ non\ défaillant\ sur\ [0, t]) \tag{1.4}$$

$$R(t) = Pr(t_f > t); t > 0; \tag{1.5}$$

L'aptitude contraire qui représente la probabilité de défaillances est appelée la dé-fiabilité (*unreliability*), c'est le complément de la fiabilité, et il est défini par la probabilité qu'une entité ne réussisse pas à fournir sa mission pendant au moins une phase $\bar{R}(t)$, où :

$$\overline{R}(t) = 1 - R(t) \tag{1.6}$$

$$\overline{R}(t) = Pr(t_f \leq t); t > 0 \tag{1.7}$$

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

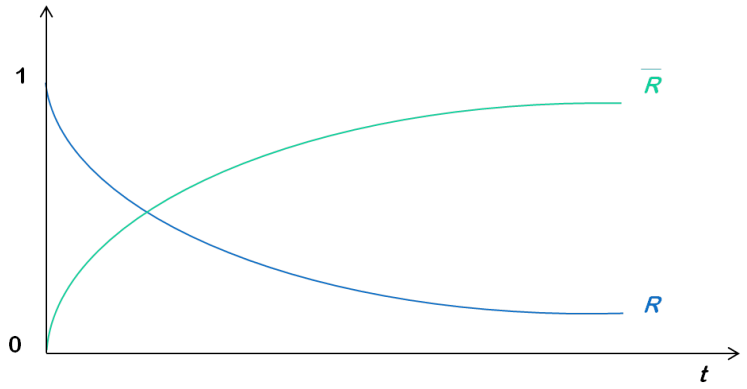


FIGURE 1.7 – *Fiabilité R, dé-fiabilité* $\overline{R}$

La fiabilité est donc concernée par un fonctionnement sans défaillance du système pendant une durée donnée, alors que la fonction ou le terme $\overline{R} = 1 - R(t)$ représente la fonction de répartition $F(t)$ qui est définie par la probabilité que la défaillance se produise pendant $[0, t]$. En dérivant la fonction de répartition à l'instant de la défaillance, on obtient la densité de probabilité $f(t)$ ou la densité des défaillances.

$$Pr(t < t_f < t + dt) = F(t + dt) - F(t) = f(t)dt \tag{1.8}$$

$$f(t) = \lim_{dt \to 0} \frac{F(t + dt) - F(t)}{dt} = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \tag{1.9}$$

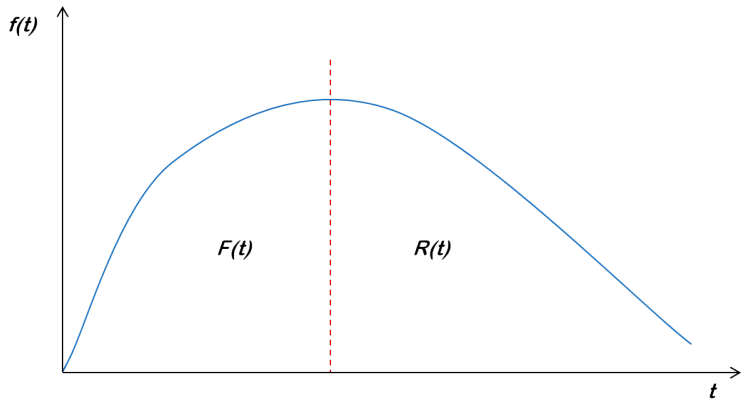


FIGURE 1.8 – *Fonction de densité de probabilité et fonction de répartition*

La figure ci-dessous (Fig. 1.9) montre la méthode par laquelle la fonction de densité de probabilité est tracée. Le temps jusqu'à la défaillance est une variable aléatoire, une défaillance se produit d'une manière aléatoire sans règles ; à partir des essais de plusieurs tranches de charges on construit les barres qui représentent la fréquence ou le nombre de défaillances de chaque tranche des charges ; plus une barre est haute, plus

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

la quantité des défaillances dans cette tranche de charges est importante (Bertsche 2008). La connexion entre les points des milieux des bars par des lignes droites (les lignes rouges) donnera la fonction de densité empirique ; le terme empirique veut dire que la fonction de densité est déterminée à partir des essais et donc d'un nombre limité de défaillances ; et si l'on multiplie le nombre des essais, nous aurons une fonction de densité avec une représentation de courbe idéale et lisse.

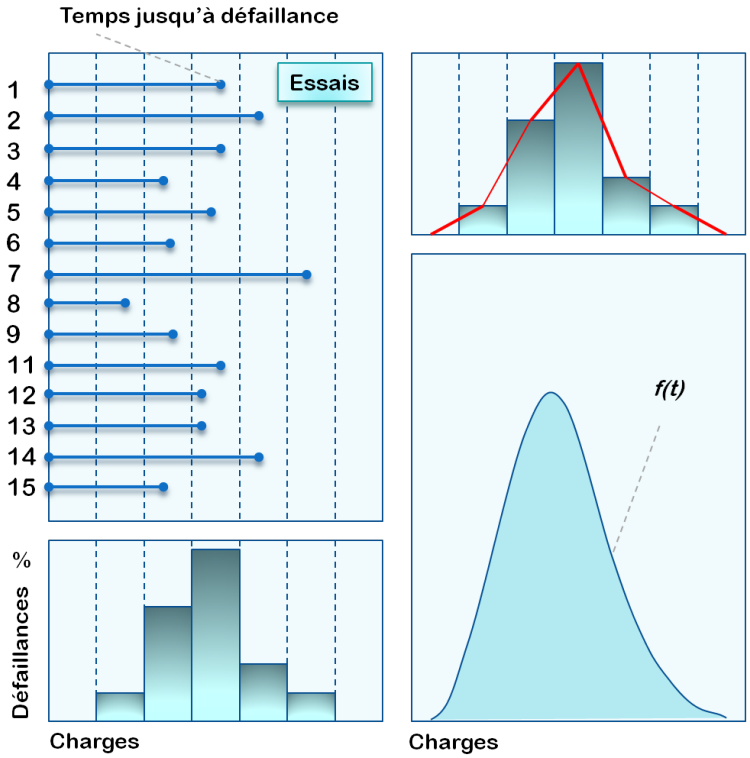


FIGURE 1.9 – *Fonction de densité de probabilité*

La somme des défaillances pendant la durée de vie peut être représentée par la fonction de distribution mentionnée précédemment $F(t)$ (Fig. 1.10) ; cette fonction commence toujours par le zéro $F(t) = 0$ et elle augmente progressivement au cours du temps (contrairement à la fiabilité) jusqu'à $F(t) = 1$ lors de la fin des défaillances de tous les composants ; la fonction de distribution est un résultat de l'intégration de la fonction de densité de probabilité :

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \tag{1.10}$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \tag{1.11}$$

$$R(t) = 1 - F(t) \tag{1.12}$$

En même temps nous avons :

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

$$R(t) = \int_t^{\infty} f(t)dt \tag{1.13}$$

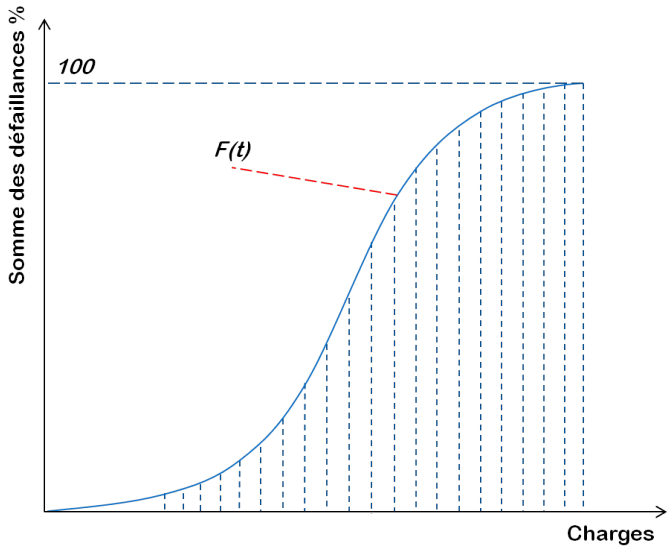


FIGURE 1.10 – *Fonction de distribution*

La fonction de distribution $F(t)$ est appelée, dans la théorie de fiabilité, la probabilité des défaillances car elle décrit la probabilité avec laquelle les défaillances apparaissent à l'instant t (la somme des défaillances en fonction de temps). La fonction de densité $f(t)$ représente le nombre des défaillances ; et la fonction $R(t)$ représente le nombre des entités survivantes ; et dans ce sens, on présente la notion de taux des défaillances (*Failure rate*) $\lambda(t)$ qui peut être calculé à partir de ces deux fonctions :

$$\lambda(t) = \frac{\text{Nombre des défaillances}}{\text{Nombre des entités survivantes}} \tag{1.14}$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \tag{1.15}$$

Le taux de défaillance $\lambda(t)$ peut être défini par la probabilité d'avoir une défaillance sur $[t, t+dt]$ sachant qu'il n'y a pas eu de défaillance sur $[0, t]$.

$$\frac{Pr(\text{Déf sur}[t, t+dt] \text{et non déf sur}[0, t])}{Pr(\text{Non déf sur}[0, t])} = \frac{F(t+dt) - F(t)}{R(t)} \tag{1.16}$$

$$\lambda(t) = \lim_{dt \to 0} \frac{F(t+dt) - F(t)}{dt} \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \tag{1.17}$$

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} \tag{1.18}$$

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Le but principal de l'étude des taux des défaillances est d'obtenir des données qui représentent le comportement global de défaillance d'un système ; le taux des défaillances est représenté par la courbe en baignoire dans la figure ci-dessous (Fig. 1.11), dans laquelle on peut observer la variation des probabilités des défaillances des entités sur un cycle de vie, on distingue trois régions :

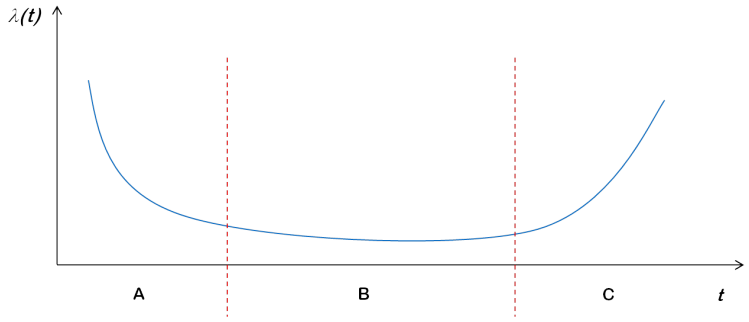


FIGURE 1.11 – *Courbe en baignoire*

1. Une première période (Zone A), de taux décroissants, qui représente l'évolution des pannes de jeunesse pendant la durée de vie d'une entité.
2. Une deuxième période (Zone B), avec des taux constants, qui représente les pannes de la vie utile.
3. Une troisième période (Zone C), avec de taux croissants, qui représente les pannes de vieillesse ou par usure.

Le taux de défaillances permet de définir la probabilité instantanée de tomber en panne. On s'intéresse aussi à la vie complète du système en présentant un paramètre associé à la fiabilité, c'est une grandeur statistique finie qui exprime la durée moyenne jusqu'à la défaillance $MTTF$ (*mean time to failure*) illustrée dans la figure ci-dessous (Fig. 1.12) et qui est définie par :

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt \tag{1.19}$$

Dans la figure (Fig. 1.12), on calcule le $MTTF$ à partir de la moyenne statistique de toutes les défaillances, t_{f_i} est le temps avant défaillance de l'élément i et n est le nombre des défaillances.

$$MTTF = \frac{t_{f_1} + t_{f_2} + ... + t_{f_n}}{n} \tag{1.20}$$

Il est impératif de ne pas confondre avec la durée moyenne jusqu'à la première défaillance $MTTFF$ (*mean time to first failure*).

Il reste enfin à évoquer une grandeur de fiabilité qui exprime le temps moyen entre défaillances $MTBF$ (*mean time between failures*) qui représente la durée de vie moyenne utile d'une entité jusqu'à sa prochaine

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

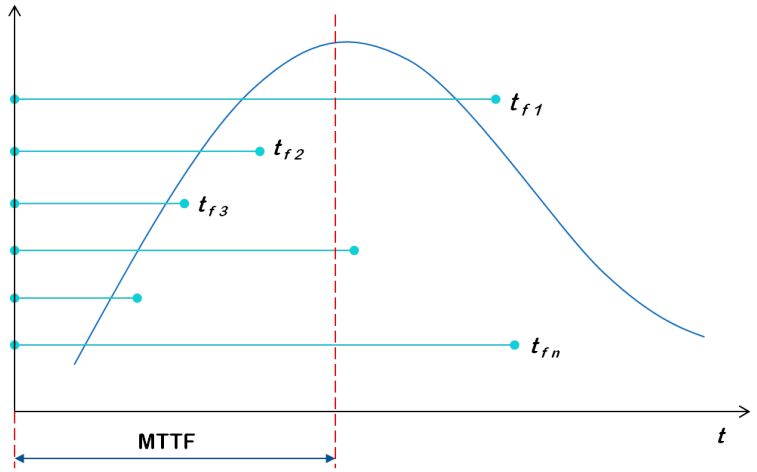


FIGURE 1.12 – *MTTF*

défaillance. La figure suivante (Fig. 1.13) illustre la notion de ces trois paramètres associés à la fiabilité.

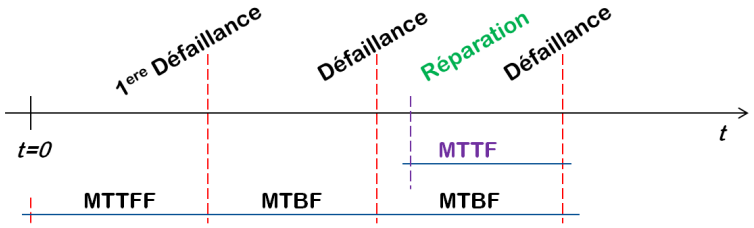


FIGURE 1.13 – *MTTFF, MTBF, MTTF*

En conclusion, on peut associer à la fiabilité les paramètres suivants :
- MTTF
- Taux de défaillance
- La probabilité que l'entité ne tombe pas en panne sur $[0, t]$
- La probabilité que l'entité soit capable de fournir sa fonction à l'instant t

1.2.2 La disponibilité (*Availability*)

La disponibilité selon la norme (NF X 60-500) est l'aptitude d'un bien à être en état d'accomplir une fonction requise dans des conditions données, à un instant donné ou pendant un intervalle de temps donné, en supposant que la fourniture des moyens extérieurs nécessaires soit assurée (Zwingelstein 1995). Selon (BS 4778) : *The ability of an item (under combined aspects of its reliability, maintainability and maintenance support) to perform its required function at a stated instant of time or over a stated period of time* (Rausand Hoyland 2004). Alors que l'indisponibilité $\bar{A}(t)$ est l'aptitude contraire, c'est la probabilité que le système soit défaillant à l'instant

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

t.

$$A(t) = Pr(\text{Système est non défaillant à l'instant} \quad t) \tag{1.21}$$

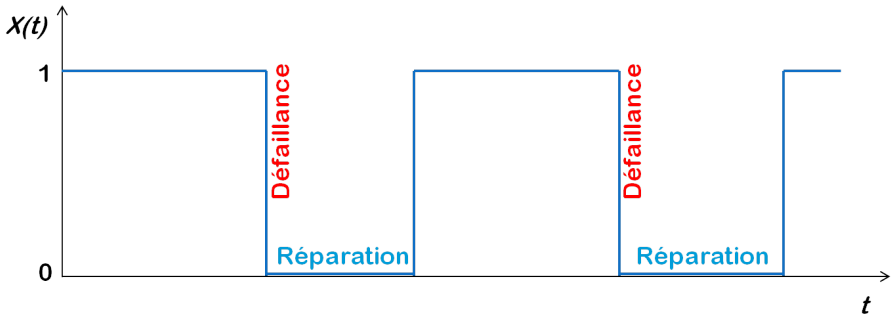


FIGURE 1.14 – *L'état du système*

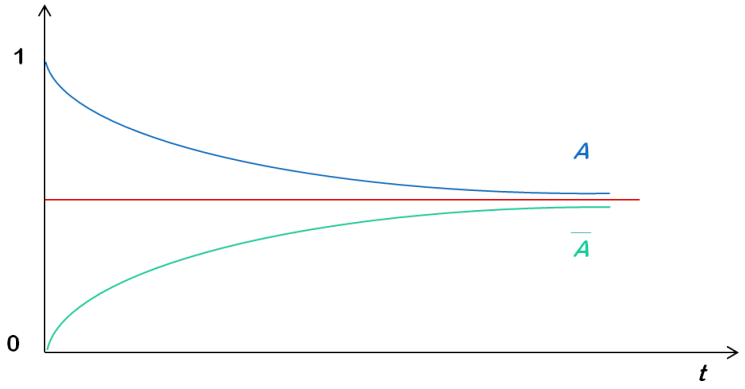


FIGURE 1.15 – *Disponibilité, indisponibilité*

Si $X(t)$ était un indicateur qui dénote l'état (Fig. 1.14) d'une entité ou d'un système à l'instant t donc (Zio 2007) :

$X(t) = 1$ Le système est en état de fonctionnement à l'instant t
$X(t) = 0$ Le système est en panne

$$A(t) = Pr(X(t) = 1) \tag{1.22}$$

$$\overline{A}(t) = Pr(X(t) = 0) = 1 - A(t) \tag{1.23}$$

De la même façon, la disponibilité instantanée $A_i(t)$ est définie comme la probabilité que le système soit en état de fonctionnement à l'instant t, et pas forcément en cet état pendant toute la durée de mission sur $[0, t]$.

Pour les systèmes non réparables, la fiabilité et la disponibilité sont les mêmes $A(t) \equiv R(t)$, alors que dans les systèmes réparables $A(t) \geq R(t)$, cela est dû à la possibilité d'effectuer les réparations ; la seule différence est que la fiabilité est la probabilité que le système fonctionne sans avoir des défaillances jusqu'à l'instant t (Zio 2007). Dans les systèmes qui possèdent des comportements qui peuvent être décrits par des processus markoviens

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

(lorsqu'on utilise les probabilités pour modéliser l'état du système), on peut présenter la disponibilité stationnaire comme :

$$A_s = \lim_{t \to \infty} A(t) \tag{1.24}$$

La disponibilité peut tout simplement signifier la capacité d'une entité d'être dans l'état de fonctionnement pendant une durée de temps. Les grandeurs moyennes associées à la disponibilité sont les suivantes (Fig. 1.16) :

- MUT (*mean uptime*) : Le temps moyen de la disponibilité, ou la durée de bon fonctionnement après réparation et avant la défaillance.
- MDT (*mean downtime*) : Le temps moyen d'indisponibilité ou la durée moyenne d'indisponibilité entre la défaillance et la remise en état suivante. Ces deux grandeurs permettent le calcul de $MTBF$:

$$MTBF = MUT + MDT \tag{1.25}$$

$$MTBF = \frac{\text{Somme des temps de bon fonctionnement}}{\text{Le nombre des défaillances}} \tag{1.26}$$

La relation de base qui décrit la disponibilité est la suivante :

$$\text{Disponibilité} = \frac{\text{Durée moyenne de fonctionnement après réparation}}{\text{Le temps total}} \tag{1.27}$$

$$A(t) = \frac{MUT}{MUT + MDT} \tag{1.28}$$

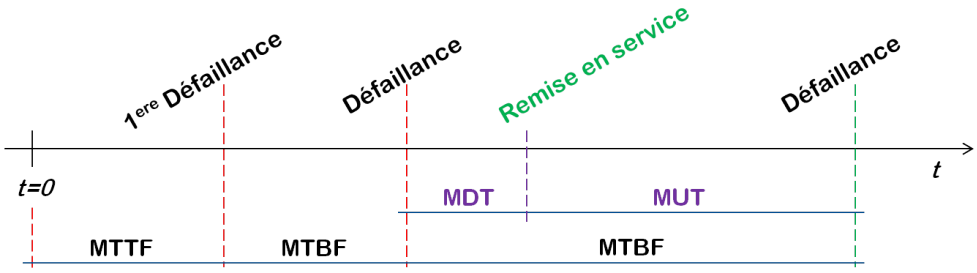


FIGURE 1.16 – *MUT, MDT*

Les paramètres déterministes de la disponibilité sont la fréquence des pannes et le temps de réparation ; plus le temps de réparation est court, plus la disponibilité est haute.

Types de disponibilité

On va citer dans ce paragraphe les deux types de disponibilité les plus connus (H Eriksen et al. 2001) :

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

i. La disponibilité intrinsèque : C'est la probabilité qu'un système ou un équipement fonctionne de manière satisfaisante à tout instant durant le temps de fonctionnement dans des conditions données. La disponibilité intrinsèque représente le point de vue du constructeur, elle ne prend en compte que la disponibilité pendant la période de fonctionnement et elle s'exprime de la façon suivante, en notant que $MTTR$ est le temps moyen de réparation (*Mean time to repair*) :

$$A_i = \frac{\text{Temps de disponibilité}}{\text{Temps de disponibilité} + \sum \text{Temps d'arrêt pour la réparation}} \tag{1.29}$$

$$A_i = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \tag{1.30}$$

ii. La disponibilité opérationnelle : C'est la probabilité qu'un système ou un équipement fonctionne de façon satisfaisante, à tout instant, durant le temps d'utilisation opérationnelle, dans des conditions déterminées. La disponibilité opérationnelle représente le point de vue de l'utilisateur, elle prend en compte tous les événements reliés à l'exploitation et elle s'exprime de la façon suivante :

$$A_o = \frac{\text{Temps de disponibilité}}{\text{Temps requis}} = \frac{\text{Temps requis - Temps d'arrêt}}{\text{Temps requis}} \tag{1.31}$$

Le temps requis peut comprendre : le temps de bon fonctionnement (*operating time*), le temps d'arrêt (*downtime*), le temps total de maintenance corrective, le temps total de maintenance préventive, le temps moyen d'inactivité (*standby time*) et les délais administratifs et logistiques.

1.2.3 La maintenabilité (*Maintainability*)

La maintenabilité est une caractéristique qui précise la facilité et la rapidité avec lesquelles un système peut être remis en un état de fonctionnement total avec une fiabilité correspondant à son âge. Selon (AFNOR 2001) : Dans des conditions données d'utilisation, c'est l'aptitude d'un bien à être maintenu ou rétabli dans un état où il peut accomplir une fonction requise, lorsque la maintenance est accomplie dans des conditions données, en utilisant des procédures et des moyens prescrits. Selon la norme (NF X 60-500) : C'est l'ensemble des actions destinées à maintenir ou rétablir une entité dans un état dans lequel elle peut accomplir une fonction requise. Selon (BS 4778) : *The ability of an item, under stated conditions of use, to be retained in, or restored to, a state in which it can perform its required functions, when maintenance is performed under stated conditions and using prescribed procedures and resources* (Rausand Hoyland 2004). La maintenabilité est exprimée par :

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

$$M(t) = Pr(\text{La maintenance d'un système soit achevée au temps} \quad t) \tag{1.32}$$

L'aptitude contraire est appelée "immaintenabilité", c'est la probabilité que le système ne soit pas réparé sur la durée $[0, t]$

$$\overline{M}(t) = 1 - M(t) \tag{1.33}$$

Parmi les grandeurs associées à la maintenabilité, on appelle taux de réparation $\mu(t)$, d'un système réparable, la probabilité que le système soit réparé entre t et $t + dt$ sachant qu'il n'était pas réparé sur l'intervalle $[0, t]$.

$$\mu(t) = Pr(\text{Système réparé sur [t, t+dt] } | \text{ non réparé sur [o, t] }) \tag{1.34}$$

$$\mu(t) = \frac{1}{1 - M(t)} \frac{dM(t)}{dt} \tag{1.35}$$

L'indice de la maintenabilité est la durée moyenne de maintenance ou de réparation, elle représente le temps technique moyen de réparation $MTTR$ (*Mean time to repair*).

$$MTTR = \frac{\text{Le temps total d'arrêt}}{\text{Le nombre d'arrêts}} \tag{1.36}$$

$$MTTR = \int_0^{\infty} (1 - M(t))dt \tag{1.37}$$

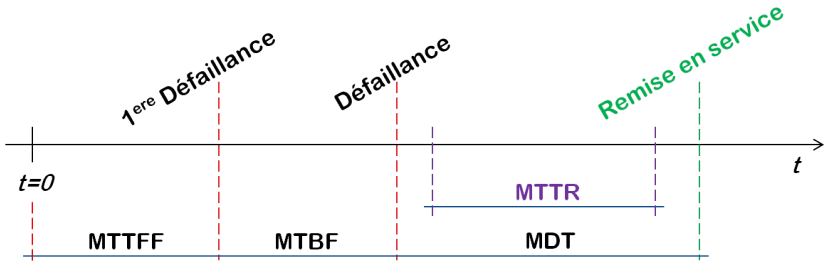


FIGURE 1.17 – *MTTR d'un système*

Le $MTTR$ englobe le temps de :
- La détection du problème
- La durée pour préparer une équipe de maintenance
- Le diagnostic et l'identification des pannes
- L'obtention des pièces de rechange
- La durée de réparation
- Les tests et les contrôles après réparation
- Le démarrage de l'équipement pour reprendre le service

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Pour distinguer entre la maintenabilité et la maintenance, la maintenabilité est une caractéristique du système et est définie en termes de probabilité. En revanche, la maintenance est une action réalisée par les techniciens de maintenance sur un système pour le remettre en état (Chapouille 2005). La rapidité de remise en état d'un système peut être mesurée par la durée active du dépannage. Pour rendre le dépannage plus facile et plus rapide, on devra prévoir, dès la conception, des moyens et des tâches pour faciliter :

- Le diagnostic des pannes
- L'accès aux composants à remplacer
- Le contrôle de la validité de la maintenance.

Relation entre la fiabilité, la maintenabilité et la disponibilité

La fiabilité représente la probabilité de pouvoir fournir certaines fonctions pendant une période de temps requise sans défaillance et dans des conditions spécifiées sans prendre en considération les actions correctives qui peuvent arriver. Ce tableau est un extrait de (HotWire 2003), on pourrait clairement remarquer qu'une augmentation de la maintenabilité implique une diminution du temps nécessaire pour les actions de maintenance, donc une disponibilité plus importante ; on remarque aussi qu'une haute disponibilité n'implique pas forcément une haute fiabilité.

TABLE 1.1 – *La relation entre la disponibilité, la maintenabilité et la fiabilité*

Fiabilité	**Maintenabilité**	**Disponibilité**
Constant	Diminue	Diminue
Constant	Augmente	Augmente
Augmente	Constant	Augmente
Diminue	Constant	Diminue

La majorité des installations industrielles exige un besoin de disponibilité aussi important que le besoin de sécurité, les concepteurs sont donc obligés de choisir des systèmes fortement fiables, ou ils fournissent des systèmes qui sont faciles à être maintenus lors d'une défaillance ; dans les deux choix, leurs produits seront coûteux et il reste la question de comparer avec l'utilité acquise d'un produit. En conséquence, la maintenabilité, est un des plus forts acteurs qui permettent aux systèmes de fonctionner en haute disponibilité opérationnelle (grâce au temps d'arrêt réduit) ce qui rend les utilisateurs satisfaits.

1.2.4 La sécurité (*Safety*)

Selon la norme (AFNOR X-06-010), la sécurité est l'aptitude d'un dispositif à éviter de faire apparaître des événements critiques ou catastro-

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

phiques. L'objectif est d'évaluer et de prévoir l'occurrence des risques potentiels induits par l'existence même du système et qui conduiraient à un endommagement. On la mesure par la probabilité qu'un système évite de générer, dans des conditions données, des événements critiques ou catastrophiques.

$$S(t) = Pr(\text{Éviter de faire apparaître des évènements critiques ou catastrophiques sur } [0,t]) \tag{1.38}$$

Lorsqu'on parle des dommages par rapport à la personne, on pourrait définir le danger comme la capacité d'un dispositif ou d'une méthode de travail de causer un dommage pour la santé (selon le décret n° 2001-1016 en 2001), et une situation dangereuse, selon (ISO 12100-1), est la situation dans laquelle une personne est exposée à, au moins, un phénomène dangereux qui est une source potentielle de dommage. L'exposition peut entraîner un dommage, immédiatement ou à plus long terme. Alors que le risque est l'éventualité d'une rencontre entre l'homme et un danger, et selon (ISO 73) c'est la combinaison de la probabilité d'un événement et de ses conséquences. Le graphe suivant (Fig. 1.18) montre les mesures de prévention des risques selon une évaluation et une analyse des risques pour connaître les modalités d'exposition. Deux possibilités de mesures peuvent être pratiquées pour réduire les risques : la protection sera obtenue par la diminution de la gravité des risques en agissant sur l'effet ; alors que la prévention sera effectuée par la diminution de la fréquence d'occurrence ou la probabilité d'occurrence des risques en agissant sur leurs causes ; cela peut définir deux zones différentes où certains risques peuvent être dans le niveau acceptable.

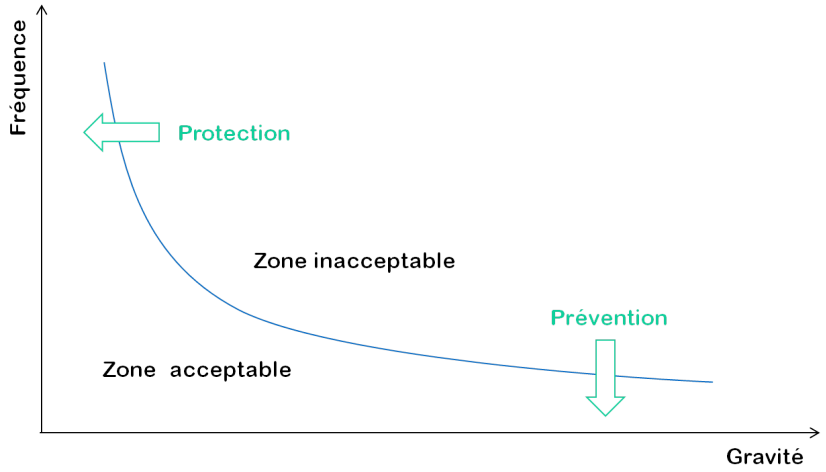


FIGURE 1.18 – *Réduire les risques*

Il est impératif de distinguer entre la sécurité dans le sens innocuité (*Safety*) et la sécurité qui signifie la confidentialité (*Security*) ; le premier

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

sens veut dire éviter les effets catastrophiques sur l'environnement et est utilisé traditionnellement dans le domaine des systèmes tolérants aux fautes ; c'est le fait d'être protégé ou loin de danger, alors que le deuxième sens est d'éviter la divulgation non autorisée et la modification des données, qui est une action normalement planifiée. Les deux sens sont unis et on ne peut pas traiter l'un isolé de l'autre.

La présence d'un danger seul n'est pas suffisant pour définir une condition de risque (Zio 2007), mais par contre il y aura une incertitude amenée par le danger lui-même, comme un état potentiel, se traduit en un état actuel d'endommagement. La définition qualitative du risque implique les deux notions :

$$\text{Risque} = \text{Endommagement} + \text{Incertitude} \tag{1.39}$$

En considérant x comme un endommagement donné, Pr est la probabilité d'avoir un tel endommagement, la définition quantitative d'un risque est la suivante :

$$\text{Risque} = x.Pr \tag{1.40}$$

L'évaluation des risques se réalise par l'analyse et l'estimation des probabilités et la potentialité des risques ; ces procédures sont entourées et gérées par la gestion des risques. La notion du "contrôle et de maîtrise des risques" dépend complètement du processus de prise de certaines décisions souvent concernant la gestion de ces procédures. L'objectif majeur qui caractérise le processus d'évaluation des risques est d'identifier le paramètre principal qui augmente la potentialité des risques ; de plus il est important de comparer la performance actuelle et les exigences concernées. Les méthodes d'analyses des risques sont nombreuses, on peut citer le HAZOP (*Hazard and operability study*), une méthode qualitative d'analyses des risques industriels qui est une des méthodes les plus utilisées dans ce domaine ; le ETA (*Event tree analysis*), une méthode quantitative qui dépend d'un modèle logique graphique, elle est utilisée dans les scénarios des accidents dans des domaines divers ; le FMEA (*Failure modes and effect analysis*) ou bien le terme français AMDE (Analyse des modes de défaillance, de leurs effets) est une méthode d'analyse qualitative et de gestion de qualité du produit et de processus. Il existe encore d'autres méthodes qui traitent l'analyse de fréquences et les conséquences.

1.3 Les défaillances (*Failures*)

Une défaillance est la cessation de l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise avec les performances définies dans les spécifications techniques (Zwingelstein 1995). Cet un événement qui met un composant ou un système dans l'état de dysfonctionnement où il ne peut

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

plus fournir sa fonction requise ; un système est considéré défaillant si ses capacités de fonctionnement sont suspendues, donc il est considéré incapable d'assurer les fonctions requises ; mais aussi si la performance a dépassé une limite définie par un seuil. Certaines défaillances n'affectent pas directement les fonctions du système et ne nécessitent qu'une action corrective ; d'autres, en revanche, affectent la disponibilité ou la sécurité du système. Pour un système, on pourrait choisir un niveau de défaillance fixé de sorte que le risque de défaillance soit considéré acceptable.

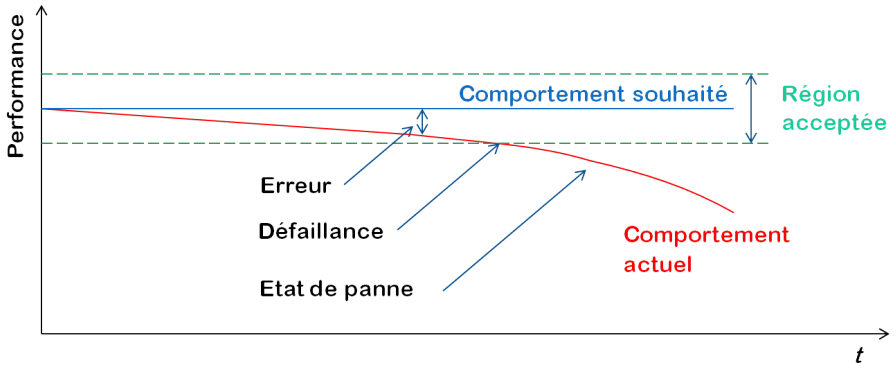


FIGURE 1.19 – *Défaillance, erreur et panne*

Si la dégradation de l'état du système est en dessous de cette valeur, qui peut être appelée le point de défaillance potentielle, il n'est pas nécessaire d'intervenir. La dégradation est définie comme l'état d'un système qui présente une déviation négative de performance, d'un des services fournis par le système, au-dessous d'un seuil défini dans les caractéristiques. En général, il existe des systèmes dans lesquels on a un seul état, soit l'état du fonctionnement parfait ou l'état de défaillance ; ce type des systèmes s'appelle des systèmes binaires. Dans d'autres systèmes, le nombre d'états possibles dépasse deux états, on peut alors avoir un état de défaillance et plusieurs autres états de fonctionnement à des niveaux différents de performance ; ce type des systèmes s'appelle des systèmes "multi-états".

Il faut bien distinguer entre la défaillance, l'erreur et l'état de panne, ce qui est illustré dans la figure (Fig. 1.19) (Rausand Hoyland 2004). L'état de panne (*Breakdown*) peut être défini par l'état d'un bien dans lequel il ne peut pas accomplir une fonction requise, excluant l'inaptitude due à la maintenance préventive ou à d'autres actions programmées ou à un manque de ressources extérieures (NF EN 13306 2001). Une panne est souvent la conséquence d'une défaillance de l'entité elle-même mais peut exister sans avoir une défaillance. La cause d'une panne est un défaut physique ou une erreur humaine. A partir de la figure (Fig. 1.19) on pourra présenter la transition de la faute à l'état de panne de la façon suivante (Fig. 1.20) :

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

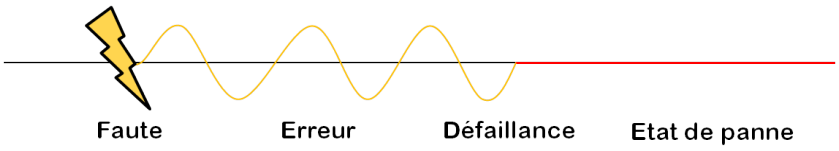


FIGURE 1.20 – *Transition de la faute à l'état de panne*

L'erreur (*Error*) est une déviation d'un état du système, d'un service ou d'un processus de l'état exemplaire souhaité. Mais aussi, le défaut (*Defect*) est défini comme toute non-conformité d'une entité aux comportements souhaités ; on appelle conformité, la capacité de fournir ou de répondre à une performance définie ou exigée. Un défaut ne conduit pas toujours à une défaillance, par contre une défaillance indique normalement un défaut.

Si les effets d'une panne ne sont pas observables, cela n'aurait pas d'impact immédiat sur le fonctionnement ou la sécurité ; on appelle ce type de pannes, une panne cachée. Dans ce cas on appelle la défaillance qui se produit après la panne cachée, "une panne composée" ; et celle-ci sera l'élément qui permet d'observer les conséquences indésirables. Les causes des défaillances peuvent être liées à la conception, la fabrication ou l'exploitation.

On définit aussi la "densité des défaillances" (*Failure density*) par la somme cumulée du nombre des défaillances à chaque instant dans la durée de vie d'un élément ; et le taux de défaillances (*Failure rate*) par le nombre moyen (arithmétique) des défaillances d'un composant ou d'un système par unité de temps d'usage mesuré, normalement en heures et parfois en nombre de défaillances par an.

1.3.1 Classification des défaillances (NF EN 13306)(NF X 60 500)

En fonction des causes

- Défaillance due à un mauvais emploi.
- Défaillance due à une faiblesse inhérente.
- Défaillance première : Défaillance d'un bien qui n'est pas causée directement ou indirectement par une défaillance ou une panne d'un autre bien.
- Défaillance seconde : Défaillance d'un bien causée directement ou indirectement par une défaillance ou une panne d'un autre bien.

En fonction du degré

- Défaillance partielle : Une perte de certaines capacités de performance mais pas la perte complète de fonctionnement.
- Défaillance complète : Un arrêt total de fonction du service principal.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

– Défaillance intermittente : Une perte de fonctionnement pour une durée trop courte et un retour en fonctionnement normal sans avoir été soumis à une maintenance.

En fonction de la vitesse d'apparition

– Défaillance soudaine : Défaillance qui ne pouvait pas être prévue par un examen ou une surveillance de fonctionnement préalable.
– Défaillance progressive : Défaillance qui peut être prédite par un test ou une vérification de performance.

En fonction de la vitesse d'apparition et du degré

– Défaillance catalectique : Défaillance à la fois soudaine et complète.
– Défaillance par dégradation : Défaillance à la fois progressive et partielle.

Par rapport aux conséquences

– Défaillance mineure : Défaillance qui permet de fournir une mission dégradée sans l'arrêt de la mission globale.
– Défaillance majeure : Défaillance qui conduit à la perte de la mission globale, endommagement du bien.
– Défaillance critique : Défaillance qui mène à une destruction importante de mission, effets sur l'environnement à court terme.
– Défaillance catastrophique : Défaillance avec risque de perte de vie humaine, effets sur l'environnement à long terme.
– Panne cachée.

Mais aussi selon (S. Natkin 2002)

– Défaillance statique : Le système produit des résultats non corrects de manière permanente (aspects fonctionnels).
– Défaillance dynamique : Le système suit un régime transitoire pendant lequel le système produit un résultat faux puis atteint un régime permanent durant lequel les sorties sont correctes (aspects temporels).
– Défaillance durable : Le système produit des résultats erronés de manière persistante.
– Défaillance transitoire : Comme une réponse à un événement, le système ne délivre pas la fonction attendue pour un moment.

1.3.2 Les modes des défaillances

Un mode de défaillance est la manière selon laquelle cette défaillance est observée (Zwingelstein 1995). C'est la façon dans laquelle un produit

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

ou un procédé se comporte pour tomber en panne pendant sa fonction (Par exemple : perte de fonction, dégradation d'une fonction, pas de fonction, fonction intempestive : un événement qui a lieu avant un moment spécifié, etc.). Il ne faut pas confondre les modes de défaillances et les mécanismes de défaillances qui sont des processus qui conduisent à une défaillance, ou ont généré une défaillance (par exemple : la fatigue, le stress et la corrosion ne sont pas des modes de défaillances mais des mécanismes de défaillances). La connaissance des modes de défaillances d'un processus, d'un produit, ou d'un système sont des points clefs dans les études de fiabilité. Les outils qui sont développés à cet effet sont :

- L'analyse fonctionnelle (*Functional analysis*).
- L'analyse des modes de défaillances, des effets et des criticités AMDEC (*FMECA*).
- L'analyse préliminaire des risques APR (*APD*).
- L'HAZOP (*Hazard and operability study*).
- L'HACCP (*Hazard analysis critical control point*).
- Les arbres de défaillances ADD (*Fault tree*).
- etc.

Ces outils seront repris en détails dans les sections qui suivent.

1.3.3 La notion du vieillissement

La dégradation est l'évolution irréversible d'une ou plusieurs caractéristiques d'un bien liée au temps, à la durée d'utilisation ou à une autre cause externe (AFNOR 2001). Le vieillissement est un processus par lequel les caractéristiques d'un système, structure ou composant se modifient graduellement avec le temps ou l'utilisation. Le phénomène de vieillissement commence à partir de la phase de fabrication, puis pendant le stockage et enfin durant la durée de vie utile du composant. Ce phénomène se traduit par une déviation négative rapide des performances des matériels, systèmes et structures, ou par une perte de fonctionnalité. Certains considèrent que le vieillissement ou la dégradation d'un dispositif apparaît lorsque le taux des défaillances est croissant, d'autres ont estimé que le vieillissement apparaît au moment où l'on a une accumulation de défaillances autour de la vie moyenne d'un dispositif.

La méthodologie utilisée pour évaluer la dégradation est décomposée en plusieurs phases, il s'agit d'une phase d'identification des composants "critiques" pour lesquels on considère que l'étude du vieillissement est nécessaire, donc il n'est pas nécessaire d'examiner tous les dispositifs ou tous les composants sur l'aspect du vieillissement, seuls ceux considérés importants pour la sûreté d'installation ou pour la perte de production sont à inspecter. Une deuxième phase est d'évaluer le vieillissement pour les composants mentionnés, il s'agit de connaitre l'impact des méca-

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

nismes de dégradation sur certaines propriétés des composant concernés et d'analyser leurs causes. La troisième phase est la mise en oeuvre pour la maîtrise du vieillissement, il s'agit finalement de trouver des solutions afin d'éviter ou d'éliminer le vieillissement. On définit également le mécanisme de dégradation ou le mécanisme de vieillissement par le processus spécifique qui modifie graduellement les caractéristiques d'un dispositif avec le temps ou l'utilisation (NF EN 13306).

Le processus de dégradation suit normalement la distribution de la loi gamma, le processus gamma suggère que l'état d'un système au cours du temps ne s'améliore pas, et donc ce système ne peut pas revenir à son état initial. Le processus gamma modélise bien la variabilité temporelle de la détérioration et permet de déterminer des politiques de maintenance optimales (Bordes et al., 2009), et il permet de modéliser l'initiation et la propagation d'un défaut en fonction d'un temps de fonctionnement ou d'une valeur d'âge.

On considère qu'un dispositif est défaillant lorsque son niveau de dégradation , donné par $X(t) = R_0 - R(t)$, dépasse un seuil spécifique, comme c'est illustré dans la figure suivante (Fig. 1.21) :

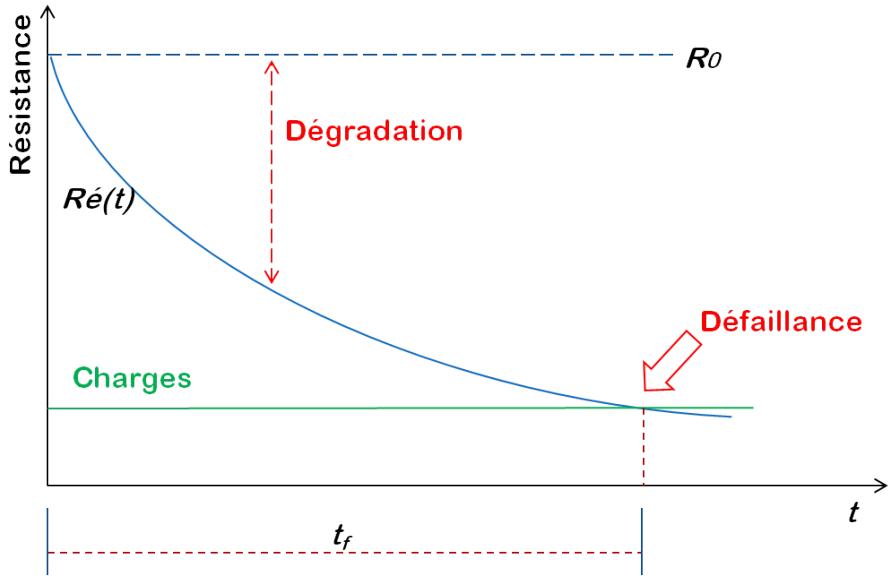


FIGURE 1.21 – *Processus de dégradation*

1.3.4 Différentes distributions des défaillances

Dans cette section, les distributions typiques de défaillances sont présentées :

Distribution à temps discret

– Binomiale : $Pr(\xi \leq k) = \sum_{i=0}^{k} p_i \qquad p_i = \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i}$

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

- Poisson : $Pr(\xi \leq k) = \sum_{i=0}^{k} p_i \qquad p_i = \frac{m}{i!} e^{-m}$
- Géométrique : $Pr(\xi \leq k) = \sum_{i=0}^{k} p_i = 1 - (1-p)^k \quad p_i = p(1-p)^{i-1}$

Distribution à temps continu

- Normale : $\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{t} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} dx$
- Log normale : $\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{ln(\lambda t)}{\sigma}} e^{-\frac{x^2}{2}}$
- Exponentielle : $1 - e^{-\lambda t}$
- Gamma : $\frac{1}{\Gamma(\beta)} \int_{0}^{\lambda t} x^{\beta-1} e^{-x} dx$
- Weibull : $1 - e^{-(\lambda t)^{\beta}}$

1.3.5 Analyses qualitatives des systèmes

Le système se compose de sous-systèmes et de composants, qui sont inter-connectés d'une manière qui permet au système de fournir une fonction définie, et de fournir les services requis avec les meilleures performances. Le but principal de l'ingénierie de fiabilité est de déterminer et d'identifier les fonctions des systèmes concernés et de définir les critères de performances qui concernent chaque fonction. Plusieurs méthodes de l'analyse de fiabilité des systèmes sont citées ci-dessous :

- Analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité AMDEC (*FMECA*) : Une méthode utilisée pour identifier les modes des défaillances potentielles pour chaque bloc fonctionnel du système, et étudier les effets de ces défaillances sur le comportement du système et son environnement, cette méthode est souvent utilisée pour planifier la maintenance, c'est un outil d'aide à la conception afin de prendre en compte les effets des pannes et de les corriger en agissant sur leurs causes. La méthode se résume par la détermination des points faibles du système, puis le classement des défaillances et la planification des solutions pour améliorer les performances et réduire le risque.
- Arbres des défaillances AdD (*FT*) : Un arbre de défaillance construit toutes les combinaisons possibles de défaillances potentielles et les événements qui peuvent provoquer un arrêt de système. Dans la construction des arbres des défaillances, les défaillances et les événements sont combinés ensemble à l'aide des portes logiques. Cette méthode est souvent utilisée dans les domaines de sécurité. La méthode se résume par la recherche de l'événement redouté et le calcul de sa probabilité d'apparition, puis la décomposition des évé-

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

nements jusqu'à l'obtention des événements de base provoquant la défaillance.

- Diagramme des causes et d'effets : Une méthode souvent utilisée dans l'ingénierie de qualité pour identifier et illustrer les causes possibles des problèmes de qualité ; et également dans l'ingénierie de fiabilité pour identifier les causes potentielles des défaillances du système.
- Les réseaux bayésiens : Un réseau bayésien peut être utilisé pour identifier et illustrer les causes possibles des défaillances des systèmes, dans le diagnostic, l'analyse des risques et la modélisation des systèmes complexes. Les réseaux bayésiens sont plus souples que les arbres de défaillances puisqu'on n'a pas besoin d'utiliser des représentations binaires (Rausand Hoyland 2004). Un réseau est représenté par un graphe dans lequel les noeuds représentent des variables aléatoires et des arcs orientés entre les noeuds représentent les dépendances entre les variables aléatoires.
- L'arbre d'événements (*Events tree*) : Le but d'un arbre d'événements est de déterminer la réaction des systèmes contre les événements redoutés, et d'identifier les différents séquences des défaillances possibles qui peuvent être générées de tel événement sous le principe que chaque séquence peut être bonne ou défaillante. Un arbre d'événements commence par une définition des événements accidents qui peuvent être une défaillance d'un des composants ou d'une cause externe ; pour chaque événement redouté il y a un arbre d'événements. Après l'identification de l'événement accidentel, on construit le diagramme et on calcule les probabilités de chaque séquence amenant à la défaillance ; entre tous les séquences, il y en a toujours au moins une qui amène à une restauration sécurisée ou à un état normal, et selon les probabilités obtenues, le risque sera déterminé et évalué et des actions correctives seront effectuées.
- Diagrammes de fiabilité (*Reliability block diagrams*) : c'est un diagramme qui illustre la structure du système et qui décrit sa fonction, si un système avait plus qu'une fonction, chaque fonction sera considérée individuellement avec un diagramme de fiabilité séparé, donc un système aurait forcément besoin de plusieurs diagrammes. Cette méthode est utile pour des systèmes composés d'éléments non réparables où l'ordre des défaillances n'a aucune importance. L'avantage majeur d'utiliser cette méthode est de rendre l'évaluation de fiabilité facile, la construction d'un diagramme de fiabilité s'effectue à partir des blocs individuels, chaque bloc correspond à un module ou une fonction du système ; les blocs sont inter-connectés entre eux en série ou en parallèle ou d'une manière mixte. Pour construire un diagramme, la première étape est de définir la fonction du système,

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

son état et le service rendu ; la deuxième étape est de décider quelle fonction et quelle tâche correspondent au minimum requis pour le fonctionnement du système. L'étape suivante consiste à associer à chaque fonction les éléments nécessaires qui participent à la réalisation ; il se peut que certains éléments soient associés à toutes les fonctions.

Le but de l'analyse qualitative est d'atteindre une description complète et détaillée ; le principal inconvénient de cette approche est que les résultats d'analyses ne peuvent être étendus à des horizons plus larges avec le même degré de certitude que l'analyse quantitative, cela résulte du fait que les résultats ne sont pas testés pour savoir s'ils sont significatifs ou dus au hasard.

1.4 La maintenance

C'est l'ensemble des décisions qui conduisent à définir les politiques de maintenance.

Selon (AFNOR, 1988) ; la maintenance vise toutes les activités destinées à rétablir un bien dans un état de bon fonctionnement, ou dans des conditions de fonctionnement données et spécifiques, pour accomplir une fonction requise ; ces activités sont une combinaison d'actions techniques, administratives et de management.

Au cours de l'exploitation, les installations industrielles sont perturbées par des dysfonctionnements qui provoquent une augmentation des coûts de production, et qui affectent, la qualité des produits et des services, la disponibilité, qui est de plus en plus demandée, la sûreté et la sécurité des personnes. Donc l'objectif de la maintenance est de limiter les effets de ces perturbations afin d'atteindre les performances exigées. Pour rentabiliser dans les meilleures conditions les biens, il est impératif de déterminer les stratégies de maintenance aptes à être appliquées sur chaque bien. Les systèmes réparables complexes sont soumis à deux types d'actions de maintenance ou de politiques de maintenance qui sont la maintenance corrective et la maintenance préventive.

La maintenance est aussi classifiée selon sa capacité à remettre le système en état normal, les actions de maintenance sont quand à elle classifiées en cinq niveaux selon leur complexité.

1.4.1 Cinq niveaux de maintenance

La division de ces niveaux est basée sur des compétences techniques différentes et objectives selon la disponibilité des personnels, des outils, les pièces de rechange, le temps et évidemment le niveau de criticité ; les cinq niveaux typiques de la maintenance sont (Zwingelstein 1996) :

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Niveau 1 : Les actions les plus simples à effectuer sans besoin de remplacer des éléments ni de démontage des structures, actions à effectuer dans les zones accessibles des biens par l'utilisateur lui-même avec des outils simples de réglage ou de calibration.

Niveau 2 : Opérations basiques de maintenance préventive souvent par une équipe qualifiée des personnels, des remplacements de composants et un contrôle de bon fonctionnement est prévu.

Niveau 3 : Opérations de maintenance de niveau haut qui nécessitent l'identification et le diagnostic des pannes, certains éléments peuvent être démontés au besoin de remplacement qui sera effectué par un technicien spécialisé du domaine à l'aide des instructions et des documentations nécessaires de maintenance.

Niveau 4 : Opérations de maintenance complexes qui impliquent un certain niveau d'expériences et la maîtrise de certaines techniques suivies par des processus de réglage et des mesures particulières.

Niveau 5 : Procédures de maintenance extrêmement spécialisées effectuées par le constructeur et qui nécessitent un niveau avancé de savoir faire et des technologies spécifiques.

1.4.2 Degrés de maintenance

La maintenance peut aussi être catégorisée selon l'efficacité et le degré avec lequel une opération de maintenance peut remettre le système à l'état de bon fonctionnement (Hongzhou Hoang, 2006 ; Pham, 2003) :

Maintenance mieux que parfaite

Une opération de maintenance qui rende l'objet à un état ou à des conditions de fonctionnement nominale, le taux des défaillances de l'unité réparée est bien supérieur au taux des défaillances des unité nouvelles identiques. Cela semble être théorique d'avoir un système réparé et plus fiable que le même système neuf, mais c'est réalisable si les progrès de la technologie sont assez rapides.

Maintenance parfaite, ou réparation parfaite

Les actions de maintenance qui restaurent l'état de fonctionnement du système à un état comme neuf avec des taux de défaillances comme ceux pour un tout nouveau système. Les tâches de maintenance ici permettent de réduire le taux de défaillance d'une façon efficace pour remettent le système, dans le meilleur des cas, à neuf. En fait, pratiquement il est impossible de rendre un élément à son état initial après une opération de

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

maintenance, surtout qu'il est remarqué que le temps moyen entre défaillances $MTBF$ prend une tendance descendante avec le temps, ceci est dû à la dégradation du système.

Maintenance minimale, ou réparation minimale

Les actions de maintenance qui restaurent le système à un état de bon fonctionnement en gardant les taux de défaillances au même niveau qu'avant la défaillance ; l'état du système est considéré aussi mauvais que vieux. Les tâches de maintenance effectuées ne changent rien à l'état du système ; on modifie le taux de défaillance des éléments changés alors que le taux de défaillance du système entier reste toujours au même niveau.

Maintenance imparfaite, ou réparation imparfaite

Ce sont les opérations de maintenance qui restaurent le système à un état de fonctionnement considéré entre l'état "aussi bon que neuf", et l'état "aussi mauvais que vieux".

Maintenance mauvaise, ou réparation mauvaise

Les actions de maintenance qui provoquent indirectement l'augmentation des taux de défaillances ou le vieillissement du système sans que le système soit affecté par une défaillance ; après la réparation l'état du système est pire que son état avant la réparation.

La pire maintenance, ou la pire réparation

Les actions de maintenance qui provoquent indirectement la défaillance du système.

1.4.3 Différents types ou stratégies de maintenance

La maintenance corrective (MC)

C'est la maintenance exécutée après la détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans l'état dans lequel il peut accomplir une fonction requise (AFNOR 2001). Elle regroupe les différentes opérations effectuées après l'apparition d'une défaillance ou d'un état de dégradation de la fonction principale. Les opérations mentionnées comportent la localisation de la défaillance et son diagnostic, la remise en état et le contrôle de bon fonctionnement. La maintenance corrective peut être :

1. Acceptée : Dans des équipements de niveau de criticité mineur ou nul (FD X60-000), certaines défaillances des équipements seront acceptées si cela conduit à maintenir un meilleur compromis (usage-coûts).

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

2. Palliative (dépannage) : Les actions physiques exécutées pour permettre à un bien tombé en panne d'accomplir sa fonction requise pendant une durée limitée jusqu'à ce que la réparation soit effectuée.
3. Curative (réparation) : Les actions physiques exécutées pour rétablir la fonction requise d'un bien tombé en panne.

La maintenance corrective est plutôt propre, les réparations sont bien planifiées, la mise en œuvre est faite, par des personnels entrainés, dépendant de l'historique des actions de maintenance du bien, et les biens sont vérifiés avant la remise en service. Les actions possibles à effectuer dans une maintenance corrective sont montrées dans la figure suivante (Fig. 1.22).

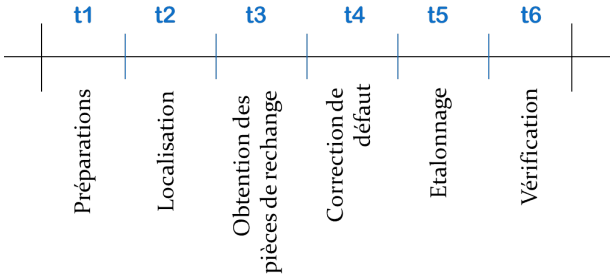


FIGURE 1.22 – *Activités et temps de la maintenance corrective*

Plusieurs façons peuvent être utilisées pour quantifier la maintenance corrective, nous allons en citer deux (B. S. Dhillon, 2006) :

i. Le temps moyen de maintenance corrective (*Mean corrective maintenance time*) : C'est une grandeur importante donnée par la formule suivante :

$$CMMT = \frac{\sum \lambda_i CMT_i}{\sum \lambda_i} \tag{1.41}$$

λ_i *Le taux de défaillance du composant i*
CMT_i *Le temps de maintenance corrective du composant i*
$CMMT$ *Le temps moyen de maintenance corrective*

ii. Le temps moyen actif de maintenance corrective : C'est également une grandeur importante qui donne généralement une meilleure valeur moyenne des temps des maintenances. C'est le mesure de temps dans lequel 50% de toutes les activités de la maintenance corrective peuvent être achevées. Cela est donné par la formule suivante (B. S. Dhillon, 2006) :

$$MACMT = anti\log[\frac{\sum \lambda_i \log CMT_i}{\sum \lambda_i}] \tag{1.42}$$

λ_i *Le taux de défaillance du composant i*
CMT_i *Le temps de maintenance corrective du composant i*
$MACMT$ *Le temps moyen actif de maintenance corrective*

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

La maintenance préventive (MP)

C'est la maintenance effectuée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits, et avant la détection d'une panne pour réduire la probabilité de défaillances ou de dégradation du fonctionnement d'un bien ou d'un service rendu (AFNOR 2001). L'intervention préventive sert à améliorer l'état global de l'élément maintenu et donc, seules les défaillances progressives sont mentionnées ici ; la maintenance préventive est considérée intéressante si les coûts induits par la perte de performance sont élevés et si les coûts de réparation et d'inspection sont faibles en comparant avec les coûts de perte de performance (Fig. 1.23).

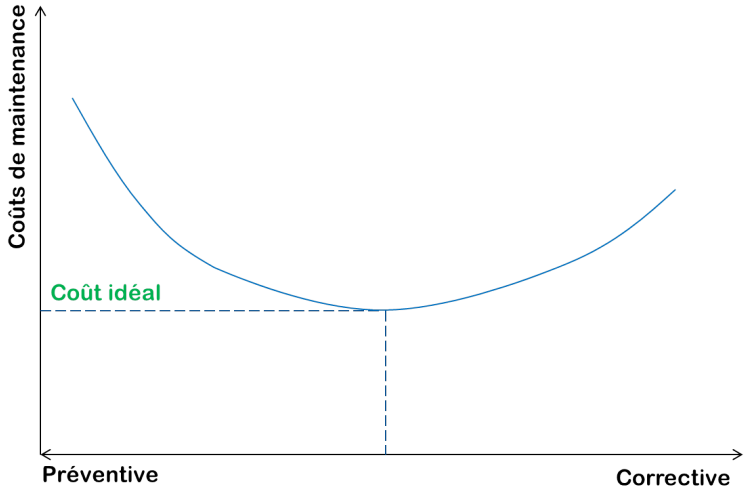


FIGURE 1.23 – *Coûts de maintenance*

i. Types de maintenance préventive

La maintenance préventive peut être (Rausand Hoyland, 2004) :

1. Maintenance systématique : Maintenance préventive achevée à des intervalles prédéterminés (à base du temps, de périodes de fonctionnement, de taille de production, ...), aucune opération de maintenance n'est réalisée avant la date déterminée. Améliorer et déterminer la période où les intervalles sur lesquels la maintenance préventive sera réalisée est un objectif d'optimisation et d'évolution de la maintenance systématique.
2. Maintenance conditionnelle : Maintenance préventive réalisée à l'aide de certaines mesures d'une ou de plusieurs variables qui représentent l'état du système (dégradation, capacité de performer, capacité de produire, etc.) d'une façon non-planifiée mais dépendant de seuils critiques prédéterminés. Donc c'est une maintenance conditionnée par l'état global observé de l'équipement ; elle a pour objectif de détecter les dégradations du bien en service ou en arrêt et

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

de détecter les pannes. L'optimisation de la maintenance préventive conditionnelle consiste à améliorer et déterminer les seuils critiques de décision (niveau de dégradation, niveau exigé de performance, niveau de sûreté et de fiabilité, etc.).

3. Maintenance prévisionnelle : Maintenance préventive qui vise à anticiper la performance future du système à partir de la phase d'exploitation. L'objectif est d'améliorer la performance globale tout en maîtrisant les coûts de maintenance. La maintenance prévisionnelle planifie l'intervention avant l'apparition supposée des défaillances ; certain l'appelle la maintenance conditionnelle prévisionnelle.
4. Maintenance pro-active (Zwingelstein, 1996) : C'est une forme avancée de la maintenance prévisionnelle qui consiste à déterminer les causes initiales des défaillances à partir de l'état de défaillance potentielle, la connaissance des mécanismes de défaillances, et les relations entre les causes et les effets ; ce qu'on appelle le retour d'expérience, chaque défaillance trouvée ne sera plus répétée.

ii. Modélisation de la maintenance préventive

La maintenance préventive est capable de ralentir le processus de dégradation des systèmes réparables, et de modifier l'état du système. Une politique de maintenance préventive nous permet de minimiser les coûts globaux du système maintenu, les coûts de maintenance et du remplacement pendant la durée de vie utile du système. Les travaux qui sont effectués pour modéliser la maintenance préventive ont comme objectif de réduire les taux de dégradation et de minimiser les coûts prévus (au total, ou coûts d'arrêt) tout en respectant certains seuils limites à chaque intervention. Dans la figure ci-dessous (Fig. 1.24), on donne comme exemple une fonction de fiabilité d'un système (qui dénote l'état du système) illustrée en deux cas, avec et sans procéder aux actions préventives ; bien évidemment, le système qui subit des actions préventives possède une fiabilité considérable comparé avec le deuxième, ce qui présente la contribution de l'opération de maintenance dans l'amélioration globale de la fiabilité et de la durée de vie utile des systèmes.

Modèle 1 (Remplacement par bloc) :
Connu aussi par le remplacement par groupe, c'est un modèle conforme pour la détermination des intervalles optimaux de la maintenance préventive pour des systèmes soumis à des événements redoutés. Dans cette politique, une entité est mise en fonctionnement à l'instant $t = 0$, elle sera remplacée périodiquement aux temps kT ($k = 1, 2, 3, ...$), ou lorsqu'elle tombe défaillante, selon la première éventualité (Fig. 1.25). Le remplacement par bloc est facile à gérer par rapport aux structures et organisation,

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

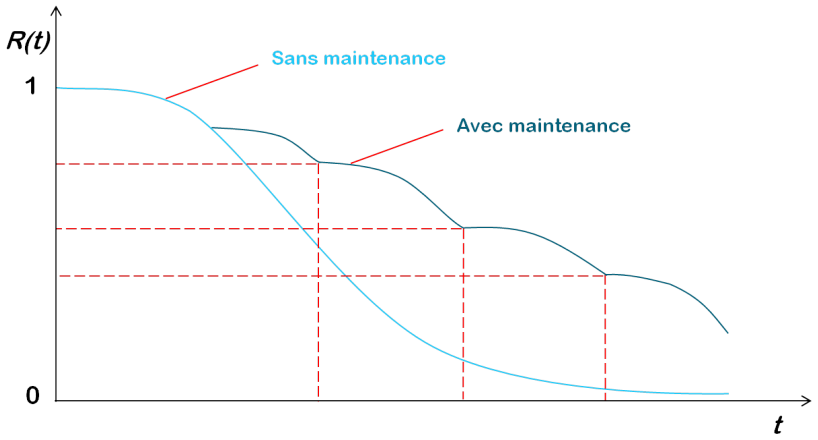


FIGURE 1.24 – *Fiabilité avec et sans maintenance préventive*

avec un seul paramètre à fixer ; l'observateur n'est pas obligé de suivre les âges des composants, ce qui peut être le principal inconvénient. La durée du remplacement est négligée dans un remplacement par bloc effectué selon des critères de coûts, par contre elle sera prise en compte pour un remplacement qui considère des critères de disponibilité.

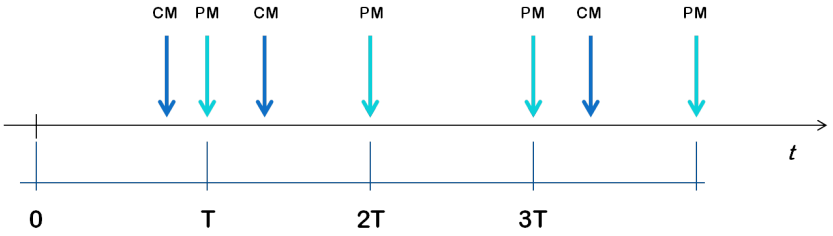


FIGURE 1.25 – *Remplacement par bloc, PM : maintenance préventive et CM : maintenance corrective*

Modèle 2 (Remplacement basé sur l'âge) :
Dans une politique de remplacement basé sur l'âge, le remplacement sera effectué dans un système, si l'âge des composants est arrivé à une valeur spécifique T ($0 < T < \infty$) à partir des dates d'installation ou de réparation (Fig. 1.26), ou bien le remplacement sera effectué lorsque le système ou certains composants sont défaillants, selon la première éventualité. La valeur T est considérée constante.

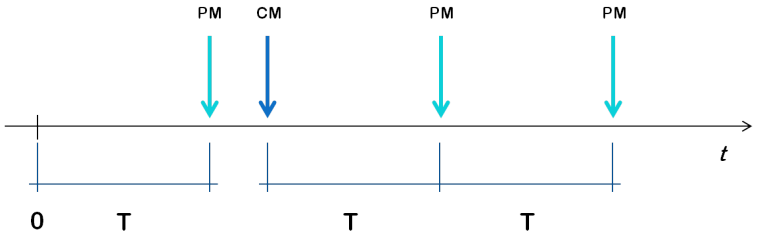


FIGURE 1.26 – *Remplacement basé sur l'âge*

© 2015 Tous droits réservés.

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Lorsque le taux des défaillances est strictement croissant, il est conseillé d'optimiser l'âge de remplacement, ce qui va minimiser les coûts prévus de maintenance et de production ; sinon au minimum il est impératif de déterminer des seuil limites supérieurs et inférieurs pour définir l'âge de remplacement. On suppose que les coûts du remplacement préventif (à l'âge T) sont C_p , et les coûts du remplacement correctif (remplacement suite à la défaillance) sont C_c et si on considère que $C_c > C_p$; selon (Barlow Hunter 1960), on pourrait estimer les coûts dans une politique de remplacement basé sur l'âge sous des critères de coûts par :

$$\eta(T) = \frac{C_c F(T) + C_p R(T)}{\int_0^T R(t)dt} \qquad T > 0 \tag{1.43}$$

La politique du remplacement basé sur l'âge est une politique optimale lorsqu'on minimise le coût $\eta(T)$.

Modèle 3 (remplacement conditionnel) :
Dans cette politique, le remplacement sera décidé en se basant sur des variables liées notamment à la dégradation et l'état des systèmes ou à la détérioration de performance (Rausand Hoyland, 2004). Les comportements du processus de détérioration du système peuvent être décrits et modélisés par des outils mathématiques et la décision sera effectuée en considérant des seuils prédéfinis au niveau de la dégradation ou de la performance. Pour un système donné, avec une fonction de détérioration $D(t)$ continue et inspecté à des moments spécifiques de temps $t_1, t_2, \ldots$; la détérioration sera mesurée à chaque inspection, si la mesure $D(t) \geq D_p$ le composant observé doit être remplacé d'une manière préventive ; si $D(t) \geq D_c (> D_p)$ le composant est considéré défaillant et il doit être remplacé d'une manière corrective ; cela est illustré dans la figure suivante (Fig. 1.27) :

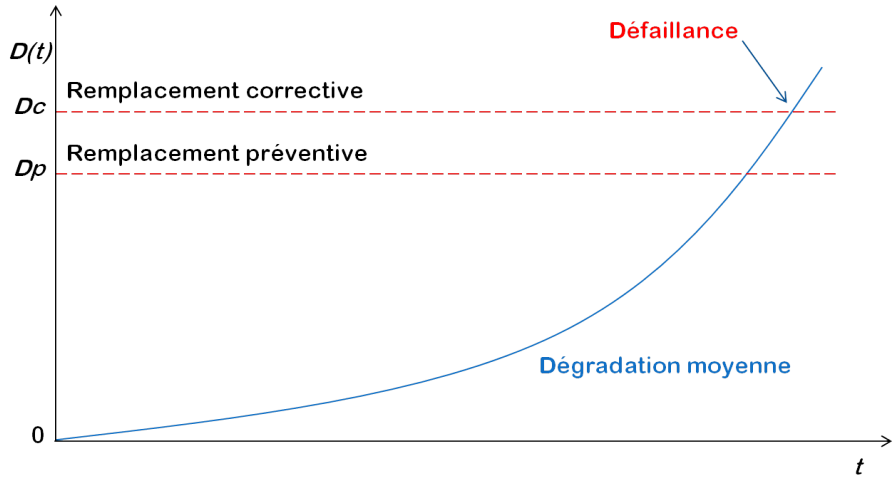


FIGURE 1.27 – *Seuil du remplacement avec une dégradation moyenne (Rausand Hoyland, 2004)*

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

La défaillance ne sera pas forcement détectée immédiatement lorsque $D(t)$ dépasse la limite des défaillances D_c mais elle sera détectée à la première inspection après la défaillance. Si on a des données sur la fonction de distribution et sur les coûts on peut déterminer des intervalles optimaux d'inspection.

Modèle 4 (remplacement opportuniste) :
Cela est applicable à des systèmes multi-composants ; pendant une opération de maintenance préventive ou corrective exécutée sur des composants défaillants, on aurait la possibilité d'intervenir et considérer les composants qui ne sont pas encore tombés en panne, mais dont le risque augmente. L'origine de ce principe vient du fait qu'il y a des dépendances entre certains composants du système.

Plusieurs autres modèles proposés dans la bibliographie, selon les taux de bénéfice, le nombre des défaillances, ou selon l'utilisation, ou le nombre des chocs, etc. Les critères les plus courants qui caractérisent une politique d'optimisation de maintenance sont basés traditionnellement sur les coûts en général ; d'autres modèles utilisent l'optimisation de la maintenance prenant en compte la fiabilité et la sûreté comme critère ; certains modèles utilisent les deux critères pour obtenir une politique globale optimale multi-objective. Les tableaux suivants (1.2) montrent les différents facteurs qui peuvent affecter la politique d'optimisation de maintenance.

TABLE 1.2 – *Politiques de maintenance et critères d'optimisation (Hongzhou Hoang 2006)*

Politiques de maintenance	Critères d'optimisation
Remplacement basé sur l'âge	Minimiser les coûts
Remplacement par bloc	Maximiser la disponibilité
Limite des réparations	Minimiser le temps d'arrêt
Limite des défaillances	Optimiser les coûts et la disponibilité
Maintenance séquentielle	...
Calcul des réparations	...

Degré de maintenance	Structure du système
Parfaite	Série
Imparfaite	Parallèle
Minimale	r/n
Mauvaise	Complexe

Disponibilité et coût optimal de maintenance

On considère la maintenance optimale si on atteint le niveau de maintenance où les coûts totaux résultants passent au minimum comme il est illustré dans la figure suivante (Fig. 1.28). Au cours du temps, les coûts directs de la maintenance ou les coûts opérationnels évoluent avec une tendance décroissante, ils représentent les coûts de la maintenance issus des

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

actions non planifiées et de leur gestion ; alors que les coûts indirects, qui représentent les coûts des actions de maintenance planifiées et des tests, vont s'accroître progressivement au cours du cycle de vie d'un produit ou d'un système. Une optimisation de la maintenance sera fréquemment effectuée pour diminuer les coûts totaux cumulés en compromis avec le temps d'arrêt du système qui est une fonction directe de la disponibilité ; et au-delà de la valeur optimale, la maintenance effectuée coûtera plus chère que l'apport de performance et de production fourni par le système.

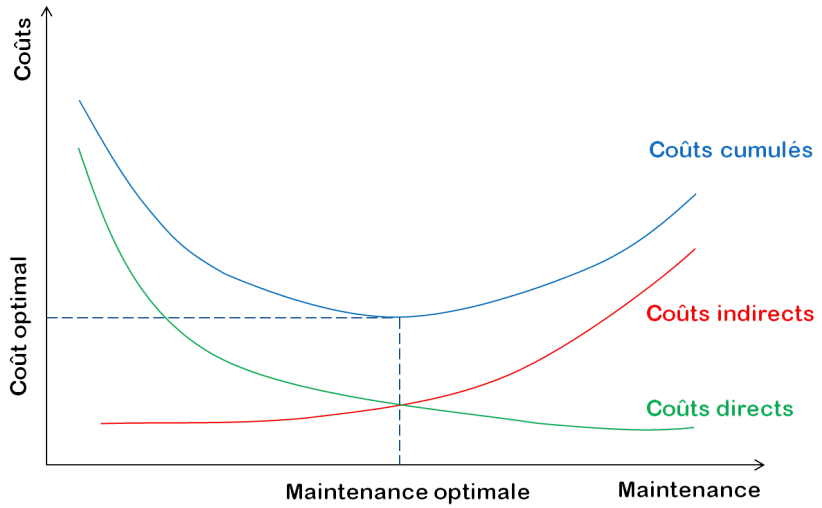


FIGURE 1.28 – *Garantir la disponibilité du système exige l'optimisation des coûts*

Dans la figure (Fig. 1.28), la zone optimale de maintenance est la région entourant la valeur optimale représentée par la maintenance effectuée avec le moindre de dépenses ; avant cette zone optimale, la maintenance est supérieurement corrective, et après, elle est plutôt préventive.

Le schéma suivant (Fig. 1.29) résume les stratégies de maintenance mentionnées auparavant avec les actions possibles.

1.5 Conclusion

L'intérêt principal de ce chapitre est de regrouper la plupart des termes généraux et de définir les notions traditionnelles utilisées pour caractériser et modéliser la fiabilité et la maintenance. Comme introduction, nous avons cité les différentes définitions de base de l'ingénierie de fiabilité ; dans un deuxième temps, nous avons parlé de la sûreté de fonctionnement et ses spécifications, les notions qui concernent la fiabilité, la disponibilité, la maintenabilité et la sécurité et les différentes approches de l'analyse de fiabilité. Dans les sections suivantes, une idée simple sur les défaillances et leurs types a été donnée, les modes des défaillances et leurs distributions. Ensuite, la maintenance a été présentée en citant les principes de base avec un passage sur les politiques de maintenance et de remplacement et les

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

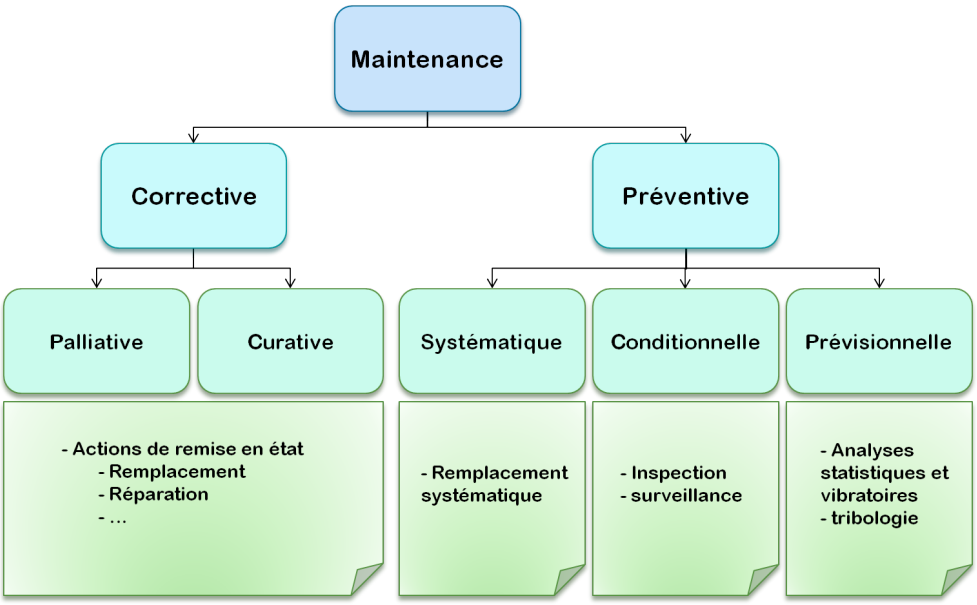


FIGURE 1.29 – *Stratégies de maintenance*

modèles de base de l'optimisation des actions de maintenance. Les notions exposées dans ce chapitre aident à mieux introduire la problématique de la thèse et les concepts associés.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

2 Modèle d'optimisation de la maintenance préventive

Sommaire

L'objectif de ce chapitre est d'examiner la littérature qui concerne les modèles d'optimisation de maintenance préventive et les observations associées. Dans un premier temps, les techniques importantes utilisées dans les différents modèles d'optimisation de maintenance seront décrites, puis les classifications des références et des techniques utilisées dans ce domaine. Nous présenterons plus tard, dans ce chapitre, le problème principal de la recherche et les problèmes secondaires associés.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

2.1 Introduction

L'attention accordée à la maintenance, pendant la phase d'exploitation des systèmes industriels automatisés, est devenue de plus en plus considérable. Les utilisateurs des systèmes de fabrication exigent, de plus en plus souvent, une maintenance "utile ou efficace" ; leurs systèmes fonctionnent avec des objectifs d'efficacité élevés, et ils sont considérés économiques si leur durée de vie utile est assez étendue, ceci est représenté par le rapport coûts-usage. La maintenance est une activité effectuée à certains intervalles de temps dans le but d'améliorer la performance et la sûreté des systèmes et qui permet ensuite de prolonger l'âge utile des équipements industriels. Dans le domaine de la sûreté de fonctionnement, la recherche a souvent pour objectif d'optimisation. Avant de présenter et de détailler le problème général, je précise que la problématique de cette thèse est de développer une méthode de conception des systèmes. Cette méthode prendra en compte certains critères en faveur de la maintenance dès la phase de conception, et permet ensuite, à partir de cette politique de maintenance, de sélectionner une architecture du système d'une manière qui favorise un niveau de sûreté avec les moindres coûts de maintenance sur l'ensemble de la durée de vie du système. Il est donc impératif de présenter, juste après la description du problème, une idée sur les modèles d'optimisation de maintenance dans la littérature, et qui peuvent aider à établir l'idée de base de notre problème.

2.2 Description du problème

Dans ce travail, on s'intéresse au processus de conception des systèmes d'automatisation. L'obtention d'un système sûr de fonctionnement, sur son cycle de vie, peut être réalisé de différentes manières. Cela peut être effectué au niveau de la conception, en réalisant un système redondant, très fiable, qui nécessite peu de maintenance sur l'ensemble de sa durée de vie. Ou lorsque le système est simple, facilement "maintenable" associé à une politique de maintenance préventive qui permet d'assurer un comportement correct (Fig. 2.1). Dans la première solution, le coût est important au niveau de l'architecture du système, et dans la seconde le coût est important au niveau de la maintenance ; plus le système est fiable, moins il nécessite de maintenance. Dans cette thèse, l'objectif est de faire un compromis entre les deux solutions pour concevoir un système qui satisfait un niveau de sûreté de fonctionnement sur une durée de mission prédéfinie avec les dépenses de maintenance les plus optimales sur l'ensemble de sa durée de vie. Cette politique de maintenance détermine, à chaque intervention, les actions de maintenance qui doivent être réalisées

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

sur tels composants au début de la mission pour satisfaire la condition de fiabilité.

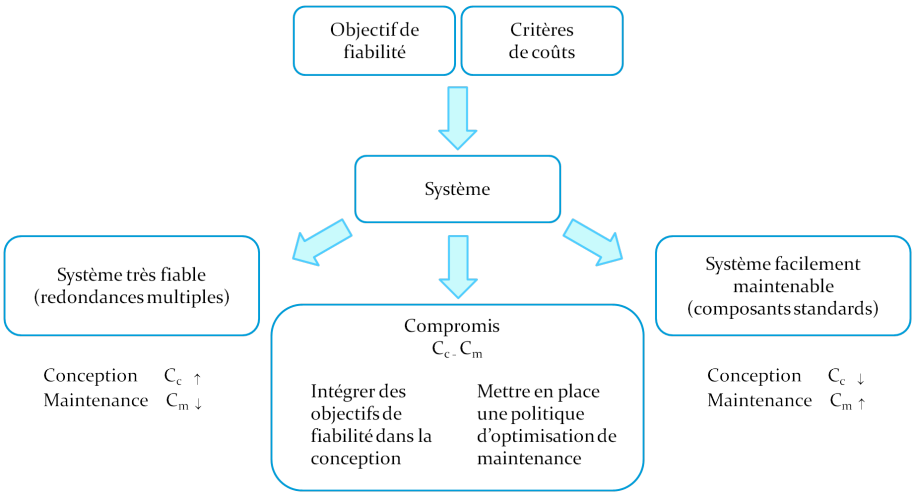


FIGURE 2.1 – *Possibilités de définir l'objectif de la conception*

2.2.1 Sélection de l'architecture optimale du système

Il s'agit de choisir l'architecture qui satisfait les conditions définies en ce qui concerne la fiabilité et les coûts de maintenance sur l'ensemble de la durée de vie. Cette méthode d'optimisation guidera les concepteurs à la sélection de la meilleure architecture qui augmente la fiabilité avec un moindre coût, pour une mission déjà définie. Le proposition d'architectures se fait par le concepteur, plusieurs structures du système peuvent être proposées, dans la mesure où elles assurent certaines fonctions (Fig. 2.2). Parmi les différentes architectures proposées ($St_1, ..., St_r$), certaines sont admissibles relativement à la fiabilité souhaitée (Encadré rouge dans la figure (Fig. 2.2)) ; elles peuvent assurer la mission avec un niveau de fiabilité requis. Parmi ces dernières architectures admissibles, certaines peuvent, sur l'ensemble de leur durée de vie, fournir la mission avec les moindres coûts de maintenance (St_i de la même figure).

Dans cette thèse, le problème concerne les architectures des systèmes qui contiennent ou qui nécessitent d'inclure des sous-systèmes de diagnostic (Fig. 2.3), qui soient à la fois capables de fournir au bon moment les informations utiles avant d'avoir une défaillance du système, et approuvables compte tenu des coûts supplémentaires (coûts comportant les coûts d'installation des composants responsables du diagnostic, et les coûts de maintenance et de défaillances de ces composants). Les informations fournies par la méthode d'optimisation permettent aux concepteurs de choisir la meilleure architecture du système ; celle qui facilite les opérations de maintenance et qui augmente la fiabilité à moindres frais de conception et de maintenance. L'intégration de certains sous-systèmes dans l'architec-

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

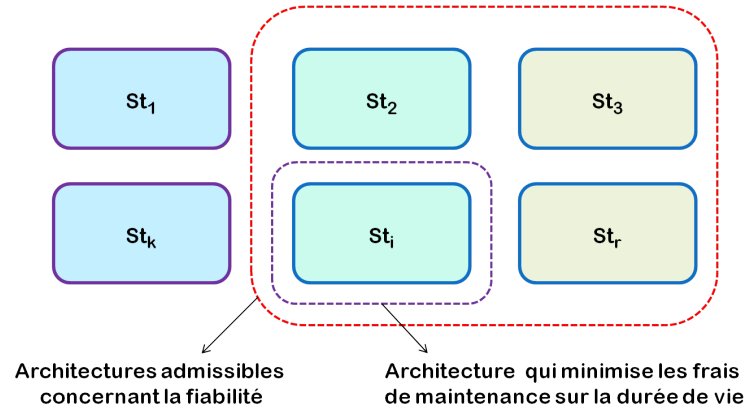


FIGURE 2.2 – *Sélection de l'ensemble des architectures admissibles du système, puis la meilleure architecture*

ture peut avoir un impact direct sur la maintenance et la maintenabilité, mais aussi un impact négatif sur les coûts de construction ; le processus d'optimisation fournira les informations utiles qui aident à faire le bon choix par le "*decision maker*".

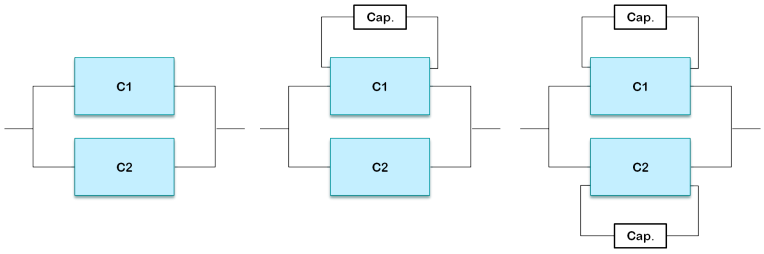


FIGURE 2.3 – *Des choix multiples des architectures, la méthode est capable de déterminer l'architecture optimale du système pour telles conditions*

Sur l'architecture retenue, lors d'une intervention pour la maintenance préventive, on saurait déterminer quelles actions de maintenance doivent être effectuées (Fig. 2.4).

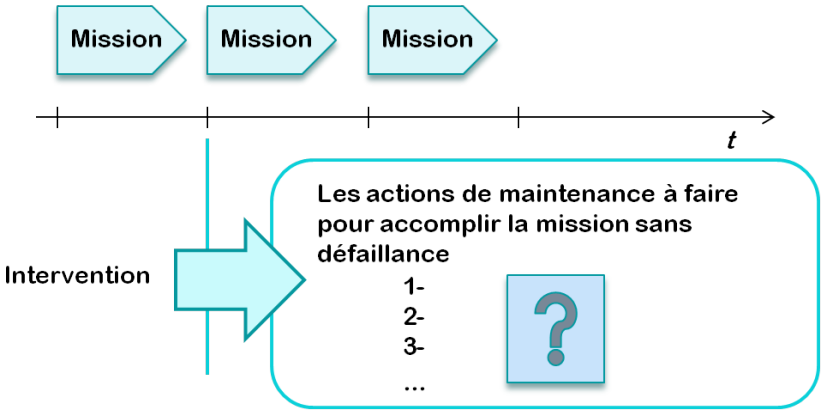


FIGURE 2.4 – *Les actions de maintenance proposées lors de l'intervention*

Après chaque inspection, la date de la prochaine intervention sera

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

fournie selon le planning des missions. Ces mesures vont garantir, avec le moindre coût, un niveau de fiabilité requis et qui permet au système de bien accomplir la mission pour laquelle il a été conçu et jusqu'à la prochaine date d'inspection qui représente la date de fin de sa mission.

Ces opérations de maintenance permettent, tout au cours du cycle de vie, de maintenir la performance globale qui se dégrade au fil du temps et de compenser la perte d'efficacité.

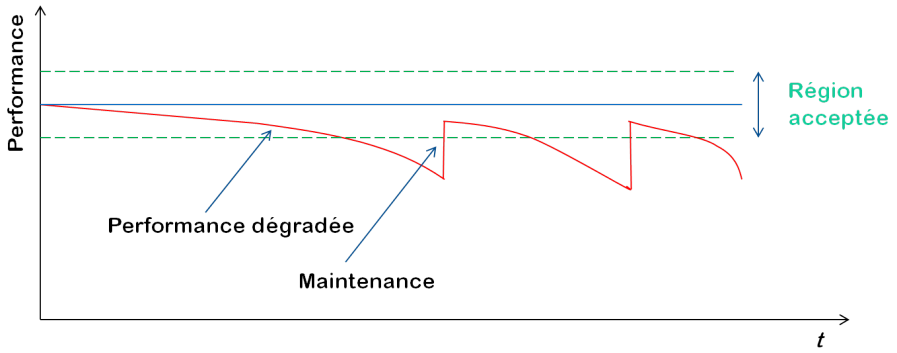


FIGURE 2.5 – *Dégradation de performance*

Un système de maintenance est généralement organisé de la façon suivante : Un plan de maintenance détermine, à chaque intervention, les actions à effectuer. Le choix de ces actions n'est pas toujours simple (le remplacement d'un composant n'est pas toujours la meilleure solution pour garantir la fiabilité et la disponibilité du système). Par ailleurs, une intervention de maintenance peut entrainer le besoin d'une autre intervention pour obtenir la performance visée. Pour palier ce problème, on peut utiliser la connaissance sur le fonctionnement du système et les tâches de maintenance déjà effectuées, qui constitue le retour d'expériences qui est la base du processus d'aide à la décision qui permettra de définir les actions à effectuer.

De nombreuses études sont réalisées pour déterminer les dates optimales d'inspection (Zhao & Nakagawa, 2013), les dates des remplacements préventifs (Zhang, Yam, & Zuo, 2002) qui sont des politiques qui consistent à diminuer les coûts de maintenance et de production et qui augmentent le niveau de fiabilité, d'autres études sont effectuées pour déterminer les âges optimaux des composants au moment de remplacement (Chang, Sheu, Chen, 2013), les durées optimales de remplacement (Shafiee Chukova, 2013), les intervalles entre remplacements ; mais la détermination des actions de maintenance préventive à effectuer lors d'une intervention, n'est pas assez prise en considération dans les études d'optimisation pour la maintenance.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

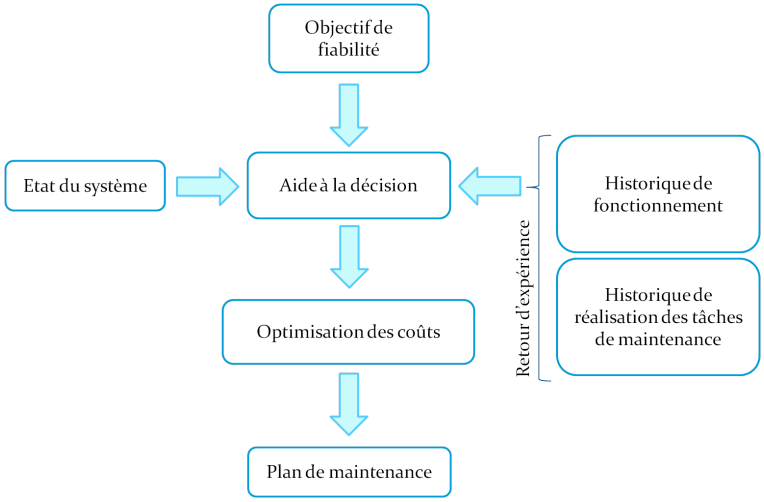


FIGURE 2.6 – *Nature du système de maintenance*

2.2.2 Sous-problèmes : Adaptation à l'histoire de la maintenance

Puisque le problème est de déterminer les meilleures actions de maintenance capables de conserver la performance du système à un niveau requis aux moindres coûts, ces actions optimales doivent être une solution efficace pour le sujet des coûts supplémentaires non-prévus. Les systèmes sont exposés pendant la phase d'exploitation à des périodes (non-planifiées) d'anomalie qui provoquent dans le meilleur des cas, une défaillance d'un des composants ou des services du système ; si le fonctionnement du composant affecté est primordial, cela peut générer une défaillance majeure du système. Un incident du genre est capable d'engendrer des charges supplémentaires assez importantes concernant la réparation (côté matériel et temps d'intervention), mais aussi concernant l'arrêt de production du service. Ces types de frais ne sont pas souvent considérés dans une planification de maintenance, sans parler de la perte produite par les opérations de maintenance préventive inutiles qui suivent l'action corrective occasionnelle. Une optimisation qui considère le coût comme critère doit absolument fournir les solutions les moins chères pour une période définie et pour accomplir une mission requise. Chaque événement non planifié doit être pris en compte dans le processus d'optimisation qui fournit au moment de la prochaine intervention toutes les actions requises et qui permettent au système de fonctionner correctement jusqu'à la fin de la mission.

La figure (Fig. 2.7), exprime que s'il y a eu une défaillance (comme un événement non planifié) pendant la mission du système entre deux inspections, cet événement impose une action corrective, pendant laquelle certains composants doivent être remplacés, et donc cela doit être considéré dans les prochaines dates d'intervention ; un décalage des actions proposées (qui sont devenues inutiles après avoir effectué l'action cor-

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

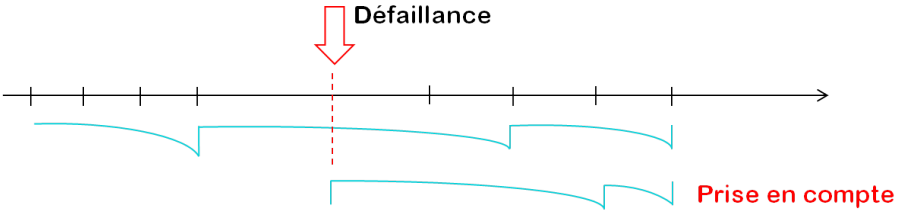


FIGURE 2.7 – *Adaptation aux événements non planifiés, après avoir une défaillance, la méthode fournit des solutions adaptées au changement non-planifié*

rective) est envisagé d'une manière appropriée qui planifie un nouveau calendrier dans l'historique de la maintenance.

2.2.3 Hypothèses

La méthode proposée dans la thèse repose sur les hypothèses suivantes :

1. La date d'intervention pour exécuter la maintenance préventive dépend de la mission prédéfinie, le responsable de maintenance connait la date de début et de fin de la mission du système.
2. Puisque les missions ne sont pas forcément identiques, on considère que les durées des missions ne sont pas forcément périodiques, cela dépend de chaque système et des missions pour lesquelles il a été conçu. On pourrait avoir dans le planning de maintenance des inspections à différentes échelles de temps et à des durées de mission différentes et dépendant des services fournis par le système.

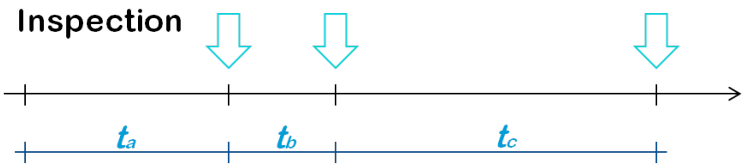


FIGURE 2.8 – *Inspection à des durées différentes et donc pas forcément périodiques*

3. La méthode d'optimisation est applicable quelle que soit la loi de défaillances utilisée ; il n'y a pas de restriction par rapport aux lois de fiabilité des composants, les taux de défaillances des composants ni par rapport aux variations des taux des défaillances au cours de temps. Cette liberté d'utilisation de certains principes favorise la méthode.
4. La décision effectuée à chaque intervention pour la maintenance a des aspects dynamiques sur le processus d'optimisation. On va déterminer, à chaque intervention, les meilleures actions de maintenance préventive capables de donner au système un certain niveau

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

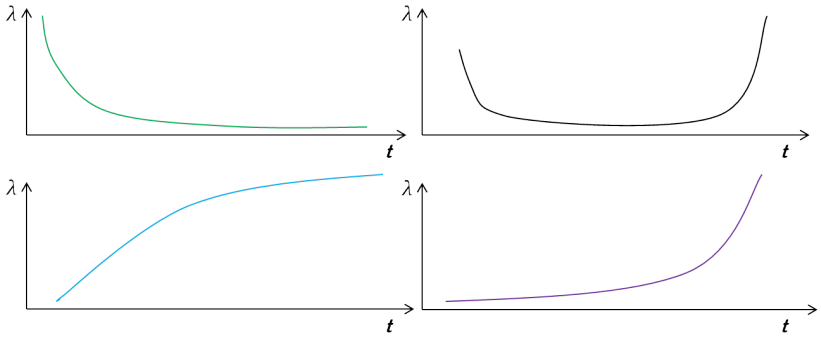


FIGURE 2.9 – *Il n y a pas de restriction par rapport aux variations des taux des défaillances au cours du temps*

de fiabilité au moindre coût de maintenance. Il se peut qu'un système nécessite des opérations de maintenance multiples dans une seule intervention et, dans ce cas là, on prendra en compte l'influence de toutes les actions de maintenance qui peuvent affecter la fiabilité du système. Cela est représenté par l'impact direct des actions sélectionnées sur la fiabilité du système.

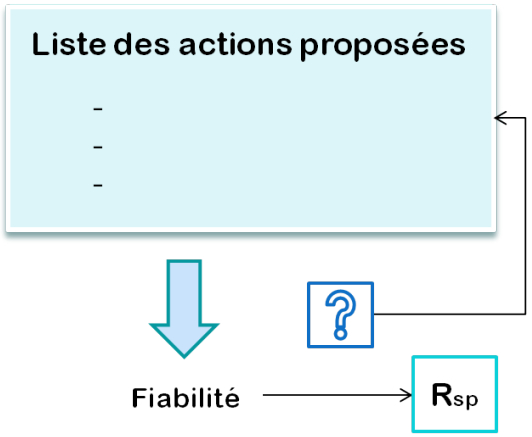


FIGURE 2.10 – *Impact direct des actions proposées sur la fiabilité du système - R_{sp} : limite de fiabilité*

Après avoir présenté la problématique de la recherche, ainsi que l'ensemble des hypothèses et les problèmes associés, il est impératif de citer les travaux effectués dans cette orientation. Certaines notions clés auront plus d'attention que d'autres, dans un premier temps je vais m'intéresser à présenter les problèmes d'optimisation de maintenance ; et je vais présenter dans un deuxième temps le problème de remplacement, et je conclurai le chapitre par les points d'intérêt importants de cette étude.

Les modèles d'optimisation sont des outils mathématiques qui fournissent la meilleure solution possible et qui ont pour but de trouver un meilleur équilibre entre les coûts de maintenance et les avantages acquis par telle opération de maintenance à tel âge du système et sous telles conditions et environnement, sans réduire la qualité de l'opération elle-

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

même, tout en prenant toutes sortes de contraintes en considération. En général, les modèles d'optimisation de maintenance portent sur plusieurs aspects qui englobent une description technique du système étudié, et de sa mission et sa fonction ; ensuite, une modélisation du système dans les phases de détérioration possibles ; et il est impératif après, d'acquérir des informations sur les modes de fonctionnement dans de telles conditions. Chaque processus d'optimisation comporte un objectif requis comme critère, cela va guider la définition de techniques d'optimisation qui permettent de trouver un meilleur compromis entre les différentes grandeurs et atteindre le but prescrit. Les politiques d'optimisation de maintenance peuvent avoir plusieurs orientations, certaines peuvent être évaluées et comparées en ce qui concerne le rapport coûts-efficacité et la fiabilité des systèmes maintenus ; ou bien en se basant sur une valeur d'un contrôle limite optimal ; certains modèles s'intéressent à l'aspect temporel, lorsqu'on traite des problématiques liés au temps, par exemple la détermination du nombre optimal d'inspections par unité de temps, les intervalles entre remplacements, etc.

Comme nous l'avons vu dans le précédent chapitre, il y a plusieurs facteurs qui peuvent affecter les modèles d'optimisation de maintenance, nous allons les citer ci-dessous :

1. La politique de maintenance (Remplacement basé sur l'âge, remplacement par bloc, limite de défaillance, .etc), la degré de maintenance (Parfaite, imparfaite, minimale, .etc) et les critères d'optimisation (coûts minimaux, disponibilité maximale, fiabilité maximale, .etc).
2. La structure du système (système en série, en parallèle, r/n, .etc) et la distribution des défaillances (Exponentielle, Weibull, Gamma, .etc).

Par ailleurs, ces modèles peuvent être continus, ou discrets.

2.3 Optimisation de maintenance

2.3.1 Besoin d'optimisation de maintenance

Tout système a un cycle de vie qui normalement passe par trois étapes : une période avec un taux de défaillances décroissant, une période avec un taux de défaillances constant et une période avec un taux croissant ; cette dernière généralement est la plus critique, et elle représente le vieillissement ou l'usure du système, c'est pendant cette période que la fréquence des défaillances augmente avec le temps. Une défaillance, peut porter parfois des effets catastrophiques capables de provoquer un arrêt complet et

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

soudain du fonctionnement du système et de ses services, et l'objectif de la maintenance, dans ce cas-ci, est de déterminer à quel moment certains composants doivent être remplacés, mais aussi, de préciser lesquels, et ceci avant d'avoir une défaillance qui peut être dangereuse et coûteuse. D'autres fois, les défaillances évoluent progressivement provoquant une détérioration de la performance et du fonctionnement du système, ici il est aussi impératif de comparer l'utilité ou l'intérêt acquis des composants avec les coûts de leur maintenance, qui augmentent évidemment avec l'âge d'utilisation, mais aussi, il est important de déterminer à quel moment les composants seront remplacés et dans quelles conditions. Ces procédures sont plutôt compliquées considérant la façon par laquelle un système devrait être maintenu et sous quels critères.

Un véritable processus d'optimisation de maintenance permet d'améliorer l'efficacité globale du système et "la qualité de performance" ; certaines activités lors de l'optimisation de la maintenance rendent efficace ce processus, par exemple : renoncer à certaines exigences complexes inutiles, identifier les tendances défavorables des défaillances, reporter le processus de maintenance en "Feedback" et profiter des historiques de la maintenance corrective et préventive et analyser le comportement du système.

2.3.2 Les différentes méthodes d'optimisation

Pendant un processus d'optimisation de maintenance, des valeurs limites des fonctions objectives sont généralement déterminées selon les besoins associés à telle opération de maintenance et sous telles conditions de fonctionnement et dans tel environnement. Les variables de ces fonctions objectives sont parfois attribuées à des valeurs réelles dynamiques, l'opération d'optimisation est donc appelée ici un processus d'optimisation continue, dans laquelle les conditions d'optimisation varient au cours du temps. En revanche, une opération d'optimisation qui utilise des fonctions objectives à valeurs discrètes est appelée un processus d'optimisation discrète. Le problème est souvent considéré comme un problème de maximisation, ou de minimisation des fonctions objectives ; les solutions sont parfois exactes et elles garantissent toutes les possibilités (méthode qui prend du temps avant d'avoir des solutions optimales ; selon (Fyffe et al. 1968) le temps de calcul nécessaire pour avoir une solution optimale augmente exponentiellement avec l'augmentation de nombre des variables de décision). D'autre fois, les solutions sont approximatives et elles exigent une estimation (méthodes heuristiques), elles garantissent souvent un certain niveau de performance et tentent de trouver des bons compromis, mais ne sont pas forcément des solutions optimales (méthode simple et rapide). Parfois des collaborations entre les deux méthodes sont combi-

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

nées pour avoir une optimisation appropriée (selon les recommandations des systèmes). En ce qui concerne la fonction objective, deux types d'optimisation sont considérés : simple-objectif et multi-objectifs.

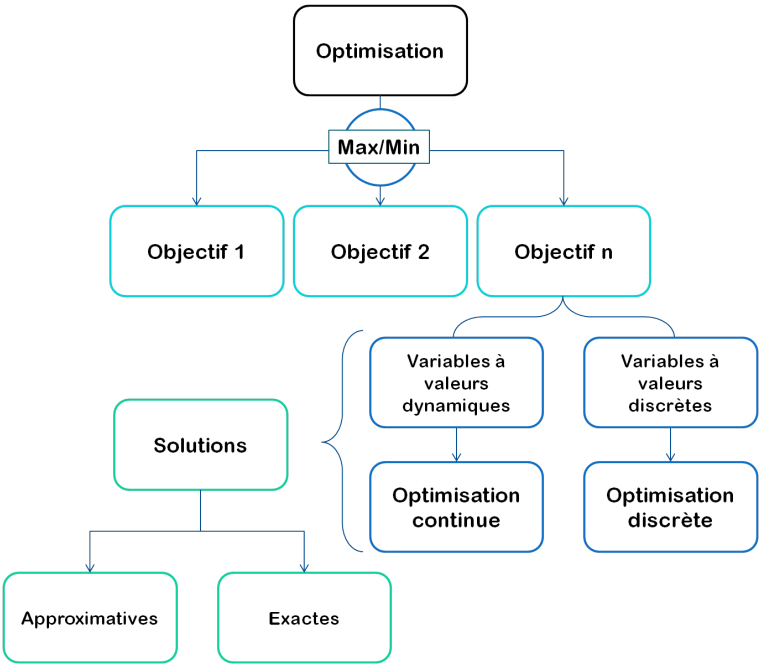


FIGURE 2.11 – *Processus d'optimisation*

Si l'objectif et les contraintes du problème étudié sont connus et définis précisément, le modèle peut être construit d'une manière précise ; ce qui n'est pas le cas dans la plupart des problèmes à cause de la non-présence de l'intégralité des ressources.
Pour résumer, si le problème a été posé et analysé, cela peut être transformé en problèmes mathématiques, pour lequel on pourrait trouver des solutions à l'aide d'une des techniques d'optimisation, sans "plonger au profond" de la signification de cette solution.

2.3.3 Modèles d'optimisation de maintenance

Nous avons défini la maintenance comme une action qui participe à restaurer ou à maintenir un système à un état souhaité (qui représente les conditions acceptables du bon fonctionnement). Plus le système est compétent dans son environnement, plus ces conditions s'élèvent à un haut niveau de complexité, et elles demandent un certain niveau d'efficacité, ce qui exige une fréquence assez élevée des opérations de maintenance pour maintenir la disponibilité du système et améliorer sa fiabilité ; cela implique d'un côté une augmentation des dépenses attribuées à la maintenance, et d'un autre côté, une augmentation du temps d'arrêt de production et de fonctionnement pour pouvoir réaliser ces tâches. En ce sens, une politique d'optimisation de maintenance vise à minimiser ces dépenses et

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

minimiser le temps d'arrêt des systèmes et maximiser sa disponibilité et sa fiabilité. Dans la littérature, les modèles d'optimisation de maintenance sont catégorisés selon les classe suivantes :

1. Modèles basés sur le temps :

   L'optimisation basée sur des modèles temporels visent à trouver l'instant optimal d'intervention pour la maintenance ou l'instant optimale d'inspection t_{opt} et de minimiser le temps d'arrêt des systèmes TDT, ou de maximiser le temps moyen entre défaillances, ou d'optimiser les périodes d'inspection et les procédures associées. Une intervention s'effectue, dans ce type de modèle, à des instants spécifiés du temps (Âge, durée de fonctionnement, une fonction objective de MTTR ou MTBF .etc).

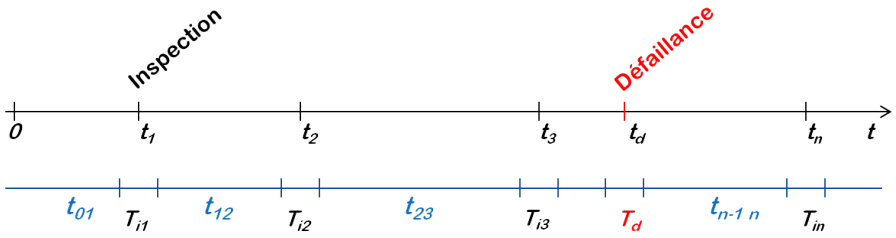


FIGURE 2.12 – *Durées d'inspections*

Comme exemple aux modèles réalisés à base du temps, on présente le temps d'arrêt total d'un élément (*Total downtime*), qui peut être donné par (B. S. Dhillon, 2006) :

$$TDT = nT_i + \frac{cT_d}{n} \tag{2.1}$$

$$T_i = \sum_{r=1}^{n} T_{ir} \tag{2.2}$$

$$T_d = \sum_{j=1}^{m} T_{dj}; \quad \forall m \in \mathbb{N} \tag{2.3}$$

où ;

TDT	*Le temps d'arrêt total*
T_i	*Le temps d'arrêt suite à l'inspection*
T_d	*Le temps d'arrêt suite à la défaillance*
n	*Nombre d'inspections*
m	*Nombre des défaillances*
c	*Constante associée aux éléments étudiés*

Grâce à l'équation précédente, le nombre optimal d'inspections peut être obtenu par :

$$n_{opt} = \sqrt{\frac{cT_d}{T_i}} \tag{2.4}$$

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Les opérations de maintenance corrective et préventive font partie de cette catégorie ; on trouve de nombreux papiers qui concernent les politiques de maintenance et les bases de décision dans (Hongzhou & Hoang, 2006), des extensions de ce qui est été fait à la base et des discussions ont été réalisées par (Ben-Daya, Duffuaa, & Raouf, 2000), (Osaki, 2002) et (Nakagawa, 2005). L'optimisation de la maintenance basée sur les stratégies de l'âge a été discutée par (Laggoune, Chateauneuf, & Aissani, 2009) pour un système multi-composants ; un système multi-composants a été aussi étudié par (Scarf & Cavalcante, 2010) considérant le problème de l'optimisation de maintenance basé sur le temps. Une politique de remplacement périodique a été présentée par (Sheu, Chang, Chen, & Zhang, 2010) : le modèle détermine un remplacement optimal en se basant sur une limite de dépenses ; la décision de maintenance pour un système réparable a été étudiée dans (Huynh, Castro, Barros, & Bérenguer, 2012) par un modèle qui permet de diminuer les dépenses de la maintenance et améliorer la performance, un modèle basé sur l'âge a été utilisé dernièrement par (Chang, Sheu, & Chen, 2013) qui ont présenté un modèle de remplacement considérant les coûts de réparation.

2. Modèles basés sur les conditions de fonctionnement :

   Dans ce type de modèle, les composants d'un système seront concernés par une opération de maintenance à des niveaux prédéterminés de certaines fonctions objectives (dégradation des composants ou de système, niveau de fiabilité, de sûreté, nombre des défaillances, niveau de performance, .etc). L'optimisation basée sur ce type de modèle vise à déterminer le seuil spécifique de fonction objective ; la décision sera adoptée en se basant sur les différentes informations obtenues pendant la surveillance de certaines fonctions ou des variables d'état du système. Selon (Mobley, 2002), l'intervention de maintenance basée sur ce type de modèle est exécutée pour déterminer si l'élément surveillé risque d'affronter certains problèmes, et pour estimer combien de temps il peut poursuivre dans son état de bon fonctionnement (ou son état dégradé) avant d'avoir une défaillance, et pour détecter et identifier l'état de dégradation de certains composants du système.

   Pour modéliser les problèmes de maintenance à base des modèles conditionnels, on définit souvent une variable aléatoire $X(t)$ qui représente le niveau de dégradation du système à l'instant t ; cette variable est inspectée à des durées τ_i, où $i = 1, 2, \ldots$; la décision sera établie selon un seuil d'intervention préventive δ, ou un seuil de défaillance ξ.

   - Si $X(t) < \delta$, aucune action n'est requise.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

- Si $\delta \leq X(t) < \xi$, une intervention préventive est prévue avec un coût Cp.
- Si $X(t) \geq \xi$, une intervention corrective est prévue avec un coût Cc.

La variable $X(t)$ est une fonction de temps modélisée souvent comme un processus stochastique, ou comme un processus Gamma. Un processus Gamma implique que l'état d'un système, à travers le temps, ne s'améliore pas, et donc ce système ne peut pas revenir à son état initial. Pour $x > 0, a > 0$ et $b > 0$, la fonction de Gamma peut être donnée par :

$$\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} u^{x-1} e^{-u} du \tag{2.5}$$

La fonction de densité de probabilité de la distribution de Gamma $\Gamma(a, b)$ peut se mettre sous la forme :

$$f_{a,b}(x) = \frac{1}{\Gamma(a)} b^a x^{a-1} e^{-bx} \tag{2.6}$$

Le système est défaillant lorsque $X(t) \geq \xi$, on peut définir la date de défaillance du système suite à la dégradation par t_d :

$$t_d = \{min(t \geq 0) | X(t) \geq \xi\} \tag{2.7}$$

Ce modèle a été présenté en 1975 pour rendre efficace la décision pour la maintenance préventive ; le papier de (Bergman 1978) est un papier exemple de ce modèle, en 2005, (Castanier, Grall, & Bérenguer, 2005) considèrent dans leur papier le processus de détérioration d'un système de deux éléments, alors que le papier de (Wang, Chu, & Mao, 2008) a présenté le problème d'optimisation d'un système d'un seul élément dans lequel ils ont déterminé les intervalles d'inspections et les seuils limites de remplacement. L'impact de la maintenance effectuée à la base de ce modèle sur la rentabilité a été discuté par (Al-Najjar, 2007) ; la disponibilité et la qualité des système ont été aussi assurées par la maintenance conditionnelle (Niu, Yang, & Pecht, 2010) ; (Tian, Jin, Wu, & Ding, 2011) ont utilisé ce modèle pour réduire les coûts de la maintenance d'un système de génération d'énergie de technologie éolienne. L'optimisation basée sur une fonction de fiabilité est présentée par (Frangopol & Maute, 2003) pour obtenir une conception d'architecture qui réduit les coûts pendant la durée de vie des produits, et par (Valdebenito & Schuëller, 2010) pour minimiser les coûts associés à la maintenance. Un modèle qui présente une nouvelle méthodologie d'optimisation de fiabilité et coûts a été introduit par (Lapa, Pereira, & De Barros, 2006) utilisant un algorithme génétique ; la stratégie de maintenance basée sur le risque est présente aussi comme une fonction d'optimisation

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

qui est faite dans (Hu, Cheng, Li, & Tang, 2009) par un modèle de réduction de l'âge.

3. Modèles basés sur les coûts :

   L'optimisation basée sur ce type de modèle a pour but de minimiser les coûts globaux de maintenance ; la concentration principale est portée sur les stratégies mises en place pour diminuer les coûts de réparation, coûts résultant des défaillances ou coûts issus de l'indisponibilité des systèmes.

   La notion de base de la prise en compte des coûts lors de l'optimisation de maintenance se trouve dans (R. E. Barlow & Proschan, 1975 ; R. Barlow & Hunter, 1960). Si on considère c_c, c_p les coûts de remplacement correctif et préventif respectivement, les coûts prévus pour un remplacement selon l'age $C(t_0)$ peuvent être donnés par l'équation suivante, où $F(t)$ est la fonction de distribution :

$$C(t_0) = \frac{c_c F(t_0) + c_p \bar{F}(t_0)}{\int_0^{t_0} \bar{F}(t)dt} \quad ; t_0 \geq 0 \tag{2.8}$$

   Les citations précédentes sont les premières approches qui ont considéré ce problème de gestion de maintenance pour réduire les dépenses (Kelly, 1989), cela s'effectue par la réduction efficace de nombre des défaillances m et, du temps d'arrêt du système TDT pour certaines applications, qui vont réduire les coûts. Une autre étude a été introduite par (Jardine, Goldrick, & Stender, 1976) pour déterminer une politique optimale de remplacement pour un système de transport, elle considérait une valeur limite des coûts de maintenance ; une solution optimale qui réduit les coûts moyens et qui considère comme objet aussi un nombre optimal de remplacements se trouve dans (Jayabalan & Chaudhuri, 1992). Un système réparable a été étudié dans un problème de maintenance préventive avec une optimisation des coûts de maintenance (Park, Jung, & Yum, 2000) ; en 2009 (Ghosh & Roy, 2009) ont optimisé la fiabilité avec la réduction des coûts en même temps, cette réduction des coûts est prise en compte avec la réduction du risque dans (Kančev & Čepin, 2011) par un modèle d'indisponibilité, et par la maximisation de la fiabilité à coté des coûts dans (Certa, Galante, Lupo, & Passannanti, 2011).

4. Modèles des garanties :

   L'optimisation dépendante sur ce type de modèle analyse tout ce qui concerne la maintenance pendant la période de garantie des systèmes dans la phase d'exploitation. On trouve une étude sur les périodes de garantie et l'optimisation de maintenance concernée dans (Pham, 2003)(Murthy & Djamaludin, 2002)(Kim, Djamaludin, &

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Murthy, 2004)(Shafiee & Chukova, 2013). Dans la plupart des publications, l'objectif global est de réduire les dépenses prévues pendant la période de garantie C_w, et de déterminer le prix du produit P et la longueur de période de garantie T_w ; ces dépenses viennent de l'obligation contractée d'intervenir en terme de maintenance pour restaurer la disponibilité des produits tombés en panne durant cette période. L'intérêt du constructeur ici, est de maximiser les profits G issus pendant cette période, les profits sont souvent reliés au prix des produits P, le montant de la vente Q, la longueur de la période de garantie T_w et même à la qualité des produits.

$$G = f(P, Q, T_w) \tag{2.9}$$

$$max(G) \equiv [max(P, Q) \wedge min(T_w, C_w)] \tag{2.10}$$

La classification des modèles de maintenance peut être effectuée selon de nombreuses méthodes, un modèle peut être déterministe s'il n'exige pas de faire appel aux méthodes probabilistes, ou stochastique s'il l'exige. Le critère du meilleur modèle est le fait d'aider à décrire correctement la situation concrète et de prendre en compte la facilité d'utilisation et les conditions spécifiques. Selon (Wang 2002), les modèles de maintenance sont catégorisés comme suit :

1. Modèles de maintenance préventive dépendant de l'âge.
2. Modèles de maintenance préventive périodique.
3. Modèles des seuils de défaillances.
4. Modèles des seuils de réparations.
5. Modèles d'effets des réparations.

Comme d'autres objectifs, la maintenance optimale est toujours requise pour la satisfaction des utilisateurs, en ce qui concerne la facilité, la rapidité de prise de décision et l'économie réalisée à long terme ; la section suivante présente la maintenance comme un objectif d'optimisation dès la phase de conception des systèmes dans la perspective de relier cette partie avec l'objectif de notre sujet de thèse.

2.3.4 La maintenance comme objectif de conception optimale

L'intégration d'une fonction objective dans les démarches et les phases de conception des systèmes s'effectue selon les conditions et les critères déterminants qui dépendent, quant à eux, de ce que l'on a décrit dans le cahier des charges et la définition des besoins. Un système peut être conçu et développé d'une manière qui satisfait une ou plusieurs fonctions objectives telles que : performance, fiabilité, maintenabilité, sûreté, flexibilité, coûts de cycle de vie ou les facteurs humains, .etc.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Selon l'ouvrage de l'AFIS 2009 "Association Française d'ingénierie système", un système conçu passe par plusieurs étapes ; la conception dépend, avant tout, du besoin défini par l'utilisateur ou des exigences du marché, cette définition est basée sur des concepts et entourée par des règles qui construit un environnement. Ce dernier est fortement considéré dans le processus de conception, dans lequel certaines démarches sont capables d'intégrer le système conçu dans son environnement réel d'exploitation. Dans la phase d'exploitation, après la mise en service, il est impératif de supporter le système par un système de soutien, qui sera chargé de maintenir les capacités nécessaires du système pendant la phase de mise en service opérationnelle.

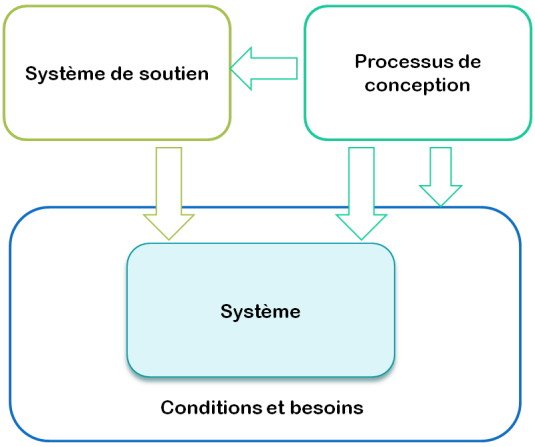


FIGURE 2.13 – *Le système de soutien chargé de supporter la fonctionnalité du système conçu pendant l'exploitation*

Ce fait impose l'intégration du processus de maintenance (étant un processus du soutien) dès la phase de conception et l'analyse des besoins ; les modifications nécessaires durant la phase de mise en service s'effectuent par la personnalisation du système de soutien responsable de la maintenance. La gestion de la maintenance est une méthode d'utilisation efficace des ressources pour maintenir l'état d'un bien dans un état souhaité ou pour le rendre dans cet état de fonctionnement. Souvent, les considérations de la maintenance sont introduites lors de la phase de conception des produits ; un concepteur de produits pour la maintenance et un technicien responsable de la maintenance sont sensés échanger des informations de forme de "feedback" entre eux. Les industries sont toujours mises sous pression de marché pour examiner tous les aspects de la performance de leurs produits comme un effort pour rester compétitif ; la maintenance est l'aspect le plus important qui est capable de conserver la performance à un niveau voulu.
La prise en compte de la maintenance dès la phase de conception peut réduire ou éliminer une partie assez importante des coûts de maintenance et d'arrêt de production ; l'importance de cette considération vient du fait

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

que la conception est la transformation d'une idée en un produit, un processus ou un service qui répond à la fois aux exigences des concepteurs (intéressés à facilement commercialiser son produit) et des utilisateurs (intéressés au prix raisonnable d'achat de tel produit). De plus, la prise en compte de la maintenabilité dès la conception peut aider à exécuter la maintenance d'une manière facile, efficace et économique, et on n'oublie pas que les coûts de maintenance d'un produit sont un facteur influençant fortement les coûts globaux qui sont un élément important de la sélection du produit par un utilisateur. La figure (Fig. 2.14) ci-dessous illustre les différents objectifs d'optimisation pour la maintenance.

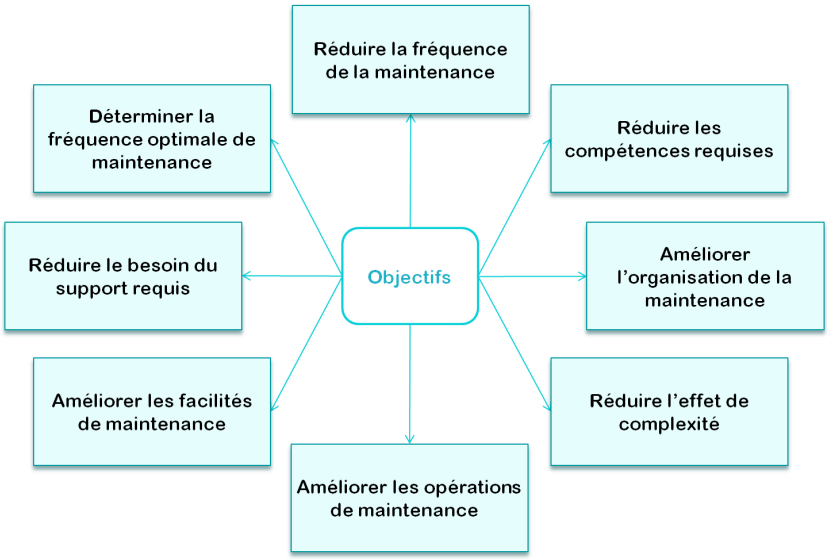


FIGURE 2.14 – *Objectifs d'optimisation pour la maintenance (B.S. Dhillon, 2006)*

Plusieurs ouvrages ont été publiés sur l'optimisation de la maintenance en tant qu'opération, ou en considérant la maintenabilité pendant la conception des systèmes et des structures ; la plupart de ces publications considèrent les coûts de maintenance et d'exploitation dans le processus d'optimisation comme une fonction objective, parfois "supplémentaire" à coté des autres fonctions plus importantes ; d'autres fois elle est considérée comme une fonction fondamentale déterminante ; on évoque par exemple les papiers de (Monga & Zuo, 1998) qui considèrent le problème de conception avec objectif de fiabilité en faveur de maintenance ; dans (Nourelfath & Ait-Kadi, 2007) l'optimisation de la maintenance s'effectue en prenant en compte une valeur limite de fiabilité et des coûts dès la conception. (Pistikopoulos et al. 2000) considèrent la maintenabilité dès la phase de conception, (Goel, J, & Weijnen, 2003) tentent d'associer l'optimisation de la maintenance avec la production et la conception, (Valdebenito & Schuëller, 2010) présentent l'intégration du processus d'optimisation de maintenance dans la conception et les calculs des structures métalliques et avec objectif de fiabilité ; et dans (Caputo, Pelagagge, & Salini, 2011)

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

une minimisation des coûts globaux de cycle de vie est effectuée dans le processus de conception.

Par ailleurs, (Moghaddass, Zuo, & Pandey, 2012) présentent une approche d'optimisation de maintenance qui prend les coûts en compte pour des systèmes réparables, une optimisation de la maintenance des composants mécaniques se trouve dans (Beaurepaire, Valdebenito, Schuëller, & Jensen, 2012) où le processus d'optimisation est basé sur une fonction de fiabilité, (Vassiliadis & Pistikopoulos, 1998) considèrent l'optimisation de la maintenance pour la fiabilité et les coûts, et (Amari & Pham, 2007) prennent en compte les coûts des composants pour chaque architecture du système pour objectif de la maintenabilité du système. Les références précédentes sont citées sous un seul thème qui peut être l'optimisation de maintenance dès la conception que cela soit pour objectif de fiabilité ou de coûts.

Dans cette thèse, et dans le but d'établir une politique de maintenance optimale, pour chaque composant de système, on dispose un ensemble d'actions de maintenance possibles à appliquer sur ce composant. Dans cet ensemble, l'action le plus importante est le remplacement ; l'importance survient du fait que l'application de cette action permet de réinitialiser l'âge du composant. Je précise encore que l'évolution du taux de défaillances des composants se base sur l'évolution de leurs âges, ce fait permet donc de jouer un rôle considérable sur la fiabilité du système. Le problème de remplacement sera présenté dans la section suivante.

2.3.5 L'optimisation multi-objective du remplacement préventif

Dans le monde de l'industrie et les problèmes réels d'ingénierie, il est rare qu'un problème ne concerne qu'un seul objectif ou un seul paramètre. Généralement, plusieurs objectifs doivent être pris en compte et être optimisés avant que toutes solutions ne soient considérées comme solutions appropriées. Souvent, la solution choisie sera un compromis en fonction d'un grand nombre des paramètres. Les techniques de l'optimisation multi-objectif peuvent être utilisées efficacement pour résoudre les problèmes d'optimisation contradictoires, on donne comme exemple le problème de maintenir la disponibilité du système et réduire les dépenses de maintenance dans un remplacement préventif. On est capable de maintenir la disponibilité lorsqu'on remplace tous les composants à chaque inspection de maintenance, cela parait une très bonne solution pour la disponibilité et la rapidité de maintenance, mais par contre les dépenses augmentent à un niveau très élevé ; l'optimisation multi-objectif prendra les deux critères en compte lors de l'optimisation.
Sur ce thème, on peut citer les travaux de (Okasha & Frangopol, 2009) qui considèrent la conception des systèmes orientée maintenance et fiabi-

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

lité, une optimisation multi-objective a permis d'assurer les stratégies de maintenance et de les rendre plus économiques ; En 2010, (Moghaddam K. Usher, 2010) ont développé un nouveau modèle d'optimisation multi-objective pour déterminer la politique de maintenance préventive optimale et le planning de remplacement dans les systèmes multi-composants. L'objectif est de déterminer un plan d'actions pour chaque composant du système, tout en minimisant les coûts globaux et maximisant la fiabilité ; trois actions ont été considérées pour chaque composant : maintenance, remplacement et rien faire.
En 2011, (Certa et al. 2011) présentent une publication qui tente d'identifier l'ensemble des éléments avec lesquels les actions de maintenance peuvent assurer un niveau requis de fiabilité jusqu'à la prochaine date de maintenance, tout en minimisant les coûts globaux et le temps de maintenance.
En 2011 aussi, (Moradi et al. 2011) tentent d'optimiser simultanément deux objectifs à l'aide d'un modèle de fiabilité, l'un est de réduire le temps de mission de fabrication (*The makespan*) et l'autre est de minimiser l'indisponibilité du système ; le nombre d'activités de maintenance et le nombre d'intervalles de maintenance ne sont pas fixés en avance ; quatre algorithmes évolutionnistes sont développés et examinés ; le but est de trouver un compromis entre les objectifs de production et ceux de maintenance à partir d'un modèle de fiabilité.
En 2012, (Yu-Lan 2012) a présenté ses travaux qui considèrent deux objectifs, la fiabilité et la disponibilité d'une machine dans le problème d'optimisation. Le planning considère la minimisation des coûts totaux de maintenance mais aussi la minimisation du temps de maintenance ; trois actions ont été proposées : le remplacement, la réparation et le service mécanique de maintenance.
Encore en 2012, (Garg et al. 2012) ont considéré le problème de redondance dans un système en série, deux objectifs sont considérés, la fiabilité du système et les coûts qui correspondent. Ils ont présenté un modèle flexible qui peut être exprimé comme un problème de programmation non linéaires flous. Afin de résoudre ce problème, un problème d'optimisation multi-objective floue a été reformulé en considérant des préférences de fiabilité et de coûts. (Torres-Echeverría, Martorell, & Thompson, 2012) ont présenté leur papier qui prend en compte l'optimisation de l'architecture des systèmes de sécurité par un algorithme multi-objectif qui garde un équilibre entre la sécurité, la fiabilité et les coûts.

2.4 Le remplacement des composants

Le remplacement des composants ou des sous-systèmes est une action efficace de maintenance ; la première décision pour adopter cette action porte sur la détermination de quels éléments "critiques" doivent

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

être remplacés ; et quels composants doivent être laissés en leurs états de fonctionnement jusqu'à leurs défaillances. La seconde décision se réfère à la détermination des actions susceptibles d'améliorer la disponibilité du système, plus l'élément est capable de fonctionner longtemps, plus la disponibilité est haute.

Dans les années 60, (Barlow & Hunter, 1960) ont proposé les deux principes de base de remplacement préventif pour déterminer une politique optimale qui minimise les coûts de production, ces deux modèles sont le remplacement préventif basé sur l'âge (ou le temps) et le remplacement par bloc (ou à des intervalles constants) ; et jusqu'à présent, de nombreuses stratégies de remplacement ont été proposées dans la littérature, et de nombreux ouvrages ont été publiés ; on cite par exemple (Arrow et al. 1962)(Barlow et Proschan 1965)(McCall 1965)(Gnedenko et al. 1969)(Barlow et Proschan 1975)(Gertsbach 1977)(Osaki 1985)(Osaki 1987)(Osaki 1992)(Ozekici 1996)(Aven 1999). En 2003, (Satow & Osaki, 2003) présentent dans leur papier une stratégie de remplacement basée sur l'âge et selon la première opportunité après un âge prédéfini, (Charles et al., 2003) tentent de minimiser les coûts de maintenance à l'aide d'une stratégie d'optimisation de maintenance préventive prenant en compte l'aspect production par un modèle de remplacement périodique, (Chien, 2010) présente une stratégie de remplacement optimal qui minimise les coûts pendant la période de garantie, une politique de remplacement basée sur la condition est présentée par (Wang, Chu, Mao, 2009), alors qu'en 2011 (Moghaddam & Usher, 2011) présentent une méthode pour minimiser les coûts de maintenance et maximiser la fiabilité à l'aide d'une stratégie de maintenance préventive, (Zhao & Nakagawa, 2012).
L'intérêt de cette approche vient du fait que la décision de remplacer certains parties critiques du système va améliorer sa fiabilité et sa disponibilité ; ainsi, il est important d'être capable d'identifier quels composants doivent être pris en considération dans telle opération.
Dans un remplacement préventif, une unité sera remplacée par une nouvelle en fonction de temps selon des intervalles réguliers, ou en fonction des valeurs limites pré associées (seuil de fiabilité, taux des défaillances, âge, .etc) ; pendant ces intervalles, une unité peut tomber en panne, cela impose l'exécution d'une maintenance corrective pour remettre le système en état. Après un remplacement, le système reviendra à l'état initial (*Good As New*) et le bon fonctionnement de système sera assuré (au niveau de sûreté de fonctionnement, efficacité, production et qualité) ainsi la vie du système (en conservant le système le maximum possible en tant que tel en bonne condition) mais aussi assurer la sécurité humaine.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

2.4.1 Importance des études

L'objectif fondamental de toutes les activités d'optimisation de maintenance est d'effectuer la maintenance uniquement lorsqu'il y a des preuves évidentes et objectives que tel équipement nécessite l'attention, et en même temps pour assurer la sécurité des équipements. Dans le cadre des interventions pour la maintenance, il est nécessaire, mais aussi difficile, de déterminer quelle procédure l'on doit prendre lors de la maintenance. Est-ce que l'inspection est suffisante ? Ou on doit remplacer certains composants ? Quel composant doit-on remplacer ? Si on remplace certains composants, à quel niveau la fiabilité du système sera montée ? Le choix est compliqué, le remplacement des composants n'est pas toujours la meilleure solution.

L'importance des études vient du fait que la décision des actions optimales, lors de l'intervention pour la maintenance, est un problème qui n'est pas souvent discuté ; on parle toujours du nombre d'inspections, des durées entre les inspections ou des optimisations sous critère des coûts, mais peu d'études sont faites avec une optimisation multi-objectives et qui considère les meilleures actions à faire pendant la maintenance, prenant en compte une mission prédéfinie et surtout, le cas d'un système à plusieurs composants. De plus, le fait d'utiliser cette méthode pour acquérir la bonne décision lors du processus de conception des systèmes est une autre bonne raison qui justifie l'importance de cette étude ; la décision obtenue assure une architecture du système qui est capable de fournir sa mission avec le moindre des coûts et avec un niveau de fiabilité défini et le plus important avec le moindre possible coûts de maintenance et de conception.

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a décrit les différentes méthodes d'optimisation de maintenance ; les modèles utilisés sous ce terme sont cités ; cette description permet d'avoir une image globale des divers outils d'optimisation. L'étude de la littérature dans le domaine de remplacement préventif a été effectuée, en précisant les méthodes d'optimisation multi-objectives. Dans un deuxième temps, on a présenté le problème et les hypothèses effectuées dans les études. On a vu que la plupart des études qui optimisent la maintenance ne considèrent pas la détermination des activités de maintenance dans une intervention préventive et pour une mission définie.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

3 Méthode de sélection des actions de maintenance, et intégration de la méthode dans la conception

Sommaire

L'objectif de ce chapitre est de présenter une méthode qui détermine les actions de maintenance capables de maintenir ou de restaurer le système en bon état de fonctionnement jusqu'à la fin d'une mission définie avec un risque fixé. Dans un premier temps, nous nous attacherons à la modélisation du système ainsi qu'à la manière avec laquelle les défaillances sont prises en compte, pour enfin décrire et développer l'algorithme de fonctionnement de la méthode proposée. Une seconde partie dans ce chapitre sera destinée à l'intégration de cette méthode dans la conception de l'architecture d'un système.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

3.1 Introduction

Une liste des tâches de maintenance est une séquence d'activités individuelles qui doivent être exécutées, à plusieurs reprises, selon un calendrier, au sein d'un système ou d'une activité industrielle. Généralement, ces tâches de maintenance sont appliquées d'une manière répétitive standard dans l'objectif de rendre cette activité industrielle plus efficace, performante et mieux organisée. La plupart des composants ou des équipements qui nécessitent une maintenance sont fournis avec cette liste des tâches qui sont prises en charge lors de la conception des systèmes ; le but est de réduire l'ensemble des efforts induits par la maintenance et de diminuer le temps requis pour déterminer les réactions qui conviennent à certains objectifs ou conditions de fonctionnement, de manière à réduire indirectement les coûts d'intervention pour la maintenance et les coûts d'arrêt du système provoqués par l'opération de maintenance. Étant donné que les décisions prises pour développer ou planifier la maintenance affectent directement la disponibilité et la sécurité des systèmes, il est indispensable voire impératif d'examiner l'efficacité des tâches de maintenance sélectionnées en tenant compte des objectifs souhaités. Autrement dit, la détermination optimale des actions de maintenance sous des critères de sûreté de fonctionnement vise à rende le fonctionnement du système sûr et indéfectible et contribue à obtenir une meilleure performance à des coûts minimaux. L'établissement de cette liste optimale des tâches de maintenance, proposées durant une intervention, requiert d'avoir une certaine configuration de l'architecture du système, pour qu'elle soit considérée capable d'être mise en service pour fournir la mission. Évidemment, une conception optimale de l'architecture influe sur l'efficacité de l'obtention de ces tâches d'une manière optimale.

3.2 Modélisation du système

3.2.1 Modélisation et architecture d'un système

La conception d'un système d'automatisation passe par la définition et la validation de trois architectures distinctes : l'architecture fonctionnelle, l'architecture matérielle et l'architecture opérationnelle (Simonot-Lion, et al., 1995).

- L'architecture fonctionnelle : elle est un résultat de l'activité de spécification, est une description des solutions envisagées pour répondre aux besoins. Elle exprime l'ensemble des activités du système.

Le modèle fonctionnel hiérarchique peut être utilisé ; il débute par la fonction ou la mission principale du système ; la mission est décomposée ensuite en un ensemble des nœuds qui correspondent aux fonctions

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

essentielles, puis aux sous-fonctions et enfin aux fonctions élémentaires (Fig. 3.1). Ces dernières forment les feuilles d'une construction d'un arbre qui correspondent à des composants simples primaires. Ce modèle hiérarchique est souvent utilisé pour représenter les systèmes de contrôle commande (Benard, Cauffriez, Renaux, 2008).

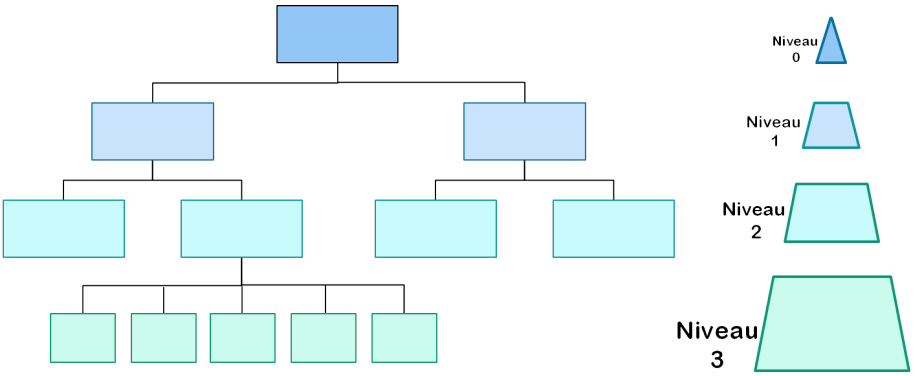


FIGURE 3.1 – *Modèle fonctionnel hiérarchique*

- L'architecture matérielle : elle définit l'ensemble des équipements matériels (sous-systèmes, capteurs, actionneurs, ...) nécessaires pour la réalisation des fonctions décrites par l'architecture fonctionnelle. Pour chaque équipement, ces caractéristiques sont connues, et nous utiliserons en particulier celui du coût.

- L'architecture opérationnelle : c'est la projection de l'architecture fonctionnelle sur une architecture matérielle, en affectant des fonctions à un équipement. Les différentes architectures opérationnelles possibles sont évaluées au niveau de leurs coûts, et au niveau de la sûreté de fonctionnement. Les fonctions "coût" prennent en compte le coût financier de la solution et le coût de maintenance.

L'architecture opérationnelle peut être envisagée selon différentes structures dont une représentation peut être le diagramme des blocs (Fig. 3.2). Un tel diagramme permet de comprendre et d'anticiper le comportement du système (Imam, Conrard, & Bayart, 2012). Dans cette structure en blocs élémentaires, chaque bloc a une fonction particulière et le diagramme décrit les interactions entre éléments.

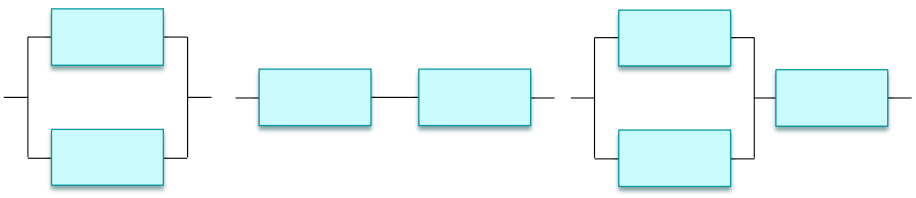


FIGURE 3.2 – *Des exemples de diagrammes des blocs*

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Lorsque deux ou plusieurs sous-systèmes sont reliés ensemble, la combinaison des différents blocs produit un sous-système de niveau supérieur. Ceux-ci sont nécessaires pour la réalisation de la fonction attendue. La structure du système définit la disposition des composants.

3.2.2 Modélisation dysfonctionnelle des composants

Des nombreux modèles stochastiques sont utilisés pour représenter et résoudre les problèmes d'évaluation de la fiabilité, ceci provient du haut degré de variabilité et d'incertitude des phénomènes étudiés. Différents types des lois stochastiques ont été dérivés à partir des distributions de base observées et sont proposés pour modéliser la fonction des taux des défaillances. Cette approche par modèle distributionnels est une méthode très commune pour analyser la durée de vie d'un système. Précédemment, le premier chapitre (1.3.4) a présenté les distributions typiques des processus stochastiques associables aux distributions des défaillances.

De façon plus formelle, un composant x_i peut se modéliser par :

- un coût de remplacement, noté c_i

- une probabilité de panne, notée $1 - R_i(t)$ dépendant de l'âge du composant. Cette dernière valeur peut être déterminée de la connaissance du taux de défaillance λ_i du composant considéré, grâce à la relation suivante :

$$R_i(t) = \int_0^t exp(\lambda_i(\tau))\mathrm{d}\tau \tag{3.1}$$

3.2.3 Modélisation dysfonctionnelle d'un système

La modélisation des défaillances est une technique qui permet d'anticiper les défaillances possibles du système et de prendre des mesures préventives ou pro-actives avant d'avoir un danger provoqué par une défaillance intempestive ; Bien évidemment il est impératif d'anticiper ces mesures assez tôt dans la phase de conception de l'architecture du système.

La modélisation des défaillances est un élément clef de l'ingénierie de fiabilité. Elle est utilisée pour estimer la probabilité d'avoir un certain état dans un système selon le succès où l'échec de plusieurs événements individuels indépendants. Il y a deux types communs de modèles de défaillances. Le premier est le modèle d'une seule défaillance (*Single-failure model*), où une seule panne est suffisante pour provoquer la défaillance du système complet ; la probabilité de défaillance du système S entier peut être représentée par :

$$Pr(\bar{S}) = Pr\{f \geq 1\} \tag{3.2}$$

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Le deuxième type est le modèle de défaillance qualifié composée (*Compound-failure model*), où chaque composant peut tomber en panne sans conduire nécessairement à la défaillance du système. Dans ce cas la probabilité de défaillance du système est donnée par la relation suivante, où $n \in \mathbb{N}$ est le nombre de défaillances requises pour induire la défaillance du système S :

$$Pr(\bar{S}) = Pr\{f \geq n\} \tag{3.3}$$

Dans les systèmes distribués, on trouve également la notion de défaillance partielle lorsqu'une partie du système tombe en panne mais que le reste du système continue son fonctionnement. Dans ce cas, le système a l'avantage d'avoir une certaine capacité de tolérance aux pannes, lui permettant de fonctionner malgré les défaillances. Le système est alors plus robuste, mais en même temps, il relève d'une conception plus complexe et d'études également plus importantes.

La distribution de la probabilité, modélisant l'occurrence de défaillance permet de déduire la fréquence potentielle des actions de maintenance à effectuer et la fréquence des pannes de composants que l'on pourra rencontrer durant l'utilisation du système pendant une durée de temps donnée.

Dans la modélisation du système par décomposition, un arrêt de mission fait suite à un dysfonctionnement interne, et plus précisément à l'occurrence d'un mode de défaillance d'au moins un nœud dans le modèle du système. Dans ce modèle, les nœuds sont liés ensemble par des opérateurs booléens (Clarhaut, Conrard, Hayat, Cocquempot, 2009)(Fig. 3.3).

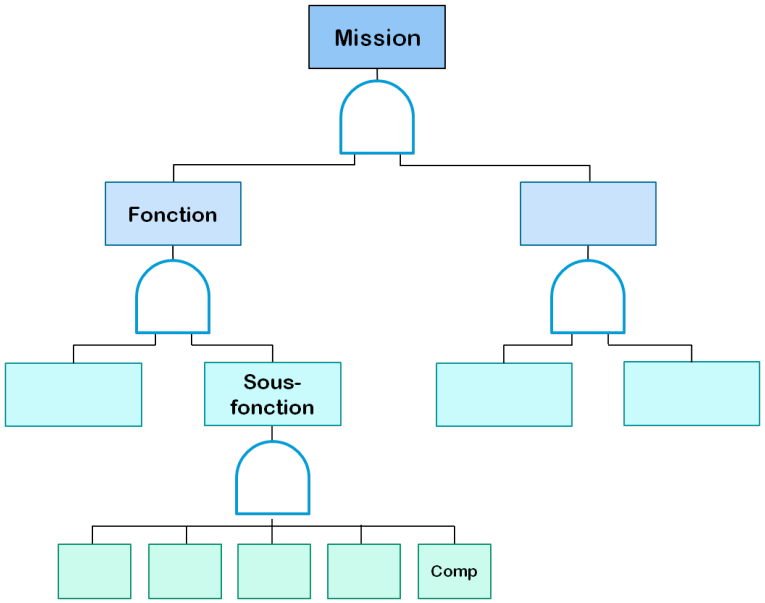


FIGURE 3.3 – *Décomposition des missions*

Ce modèle permet de procéder à une analyse qui peut fournir les

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

relations logiques entre les défaillances du système comme un événement redouté, et les modes des défaillances de chaque composant (Imam, Conrard, & Bayart, 2012) . Grâce à cette relation, une estimation de la fiabilité du système peut être effectuée par l'intégration des probabilités d'occurrence des défaillances des composants pour obtenir la probabilité d'occurrence de chaque mode de défaillances.

A titre d'exemple, dans la figure (Fig. 3.3), le dysfonctionnement de la mission du système est représenté par le diagramme hiérarchique fonctionnel, les portes logiques qui relient les différentes sous-structures du système permettent d'obtenir la relation entre les fonctions associées de différents niveaux, et la hiérarchie permet d'obtenir la relation entre les fonctions dans le même niveau. Les relations logiques obtenues d'une telle structure de système décrivent son comportement en ce qui concerne le fonctionnement et la délivrance de ses services. Dans l'exemple de la figure (Fig. 3.4), une relation logique peut être obtenue à partir de la structure du système et la nature des opérateurs logiques avec les composants C_1, C_2, C_3. Cette relation décrit le dysfonctionnement potentiel du système face aux défaillances, elle peut prendre la forme suivante :

$$Fail_{Sys} = (Fail_{C_1} \vee Fail_{C_2}) \wedge Fail_{C_3} \tag{3.4}$$

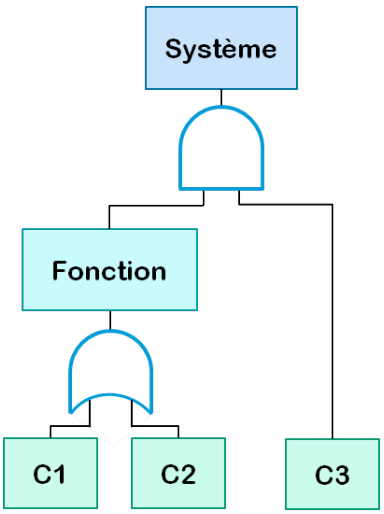


FIGURE 3.4 – *Exemple de défaillance du système*

D'autre part, on utilise souvent les diagrammes fonctionnels hiérarchiques dans le processus de conception. La démarche consiste à établir une liste des fonctions à partir des missions désirées, requises par l'utilisateur. L'objectif de la conception est alors de déterminer et de spécifier une structure capable de réaliser toutes les fonctions identifiées précédemment. Plus globalement, dans les systèmes à multi-composants, la structure du système peut être représentée par une fonction booléenne

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

composée de n variables ; où n est le nombre des composants. Si on fait correspondre à 1 l'état de bon fonctionnement et à 0 l'état de panne, on peut représenter par un vecteur $\vec{x}$, où $\vec{x} = (x_1, ..., x_n)$ l'état fonctionnel des composants du système considéré ; chaque x_i est l'état possible du composant i. Plus globalement, une fonction de structure Φ peut être définie et faire la relation entre l'état des composants et celui du système vis-à-vis de sa capacité à accomplir sa mission ; la forme de cette fonction est la suivante :

$$\Phi : \{0,1\}^n \longrightarrow \{0,1\} \tag{3.5}$$

$$\vec{x} \rightarrow \Phi(\vec{x}) = \begin{cases} 1 & \text{Bon fonctionnement} \\ 0 & \text{Défaillance} \end{cases}$$

Plus globalement, la connaissance de la fonction de structure Φ permet d'établir une fonction ϕ sur les probabilités de défaillance du système. A l'aide de cette fonction, selon la fiabilité de chaque composant, c'est-à-dire leur probabilité d'être en bon état à un instant donné, la fiabilité du système peut être évaluée et ainsi sa probabilité d'accomplir correctement sa mission.

$$\phi : [0,1]^n \longrightarrow [0,1] \tag{3.6}$$

$$\vec{x}_{proba} \rightarrow \phi(\vec{x}) = Pr(\Phi(\vec{x}) = 1)$$

Dans l'approche proposée, on souhaite déterminer l'architecture opérationnelle optimale qui permet de réaliser la mission avec un compromis coûts-fiabilité ; cependant on ne s'intéresse pas uniquement à une architecture sûre de fonctionnement en début de cycle de vie, mais on souhaite trouver la meilleure architecture en considérant l'ensemble du cycle de vie. En effet, la solution la moins chère en début de cycle de vie peut s'avérer très chère en fin de vie si elle a nécessité de nombreuses opérations de maintenance. On souhaite également intégrer la maintenance dans la conception. Ainsi la prochaine sous-section s'intéresse à la modélisation de l'activité de la maintenance en vue de pouvoir évaluer son impact.

3.2.4 Modélisation de la maintenance

Généralement, les activités de maintenance préventive sont des tâches à effectuer durant la vie du système qui consistent en des actions d'inspection, de nettoyage, de lubrification, de réglage, de positionnement ou de remplacement de certains composants, sous-systèmes ou systèmes, en raison de leur dégradation au cours du temps. Quel que soit le système concerné, les activités de maintenance préventive peuvent être classées en une de ces deux catégories : la maintenance de composants ou le remplacement de composants.
Dans cette étude, la détermination des actions de maintenance lors d'une

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

intervention dépend de la structure du système, des caractéristiques de ses composants et de la mission à exécuter. L'application de chacune des actions de maintenance a une influence immédiate sur la fiabilité du système. Donc évidemment le modèle proposé doit prendre en compte cet effet pendant l'estimation de fiabilité. Il y a ainsi un effet dynamique de tout changement au cours de la maintenance sur les calculs qui concernent la décision pour la maintenance et qui sera automatiquement pris en compte et mis à jour.

Après la présentation des différents modèles utilisés dans la démarche proposée, nous allons présenter la méthode développée pour la détermination des activités de maintenance.

3.3 Méthode de détermination des activités de maintenance

3.3.1 Description du processus

L'objectif de la méthode est de déterminer si, compte tenu de son état actuel, le système est capable d'effectuer une mission sans interruption pour opération de maintenance. Globalement, la méthode proposée procède selon la démarche suivante (Imam, Conrard, & Bayart, 2012) :

1. Estimer la fiabilité du système pour la prochaine mission selon les informations disponibles sur l'état courant du système.
2. Comparer la fiabilité du système pour cette mission avec la valeur référence de fiabilité, représentant le niveau de risque pris.
3. Inventorier les actions de maintenance possibles à effectuer pour le système et selon les conditions d'intervention.
4. Pour chaque action possible, une estimation de la fiabilité de la mission est effectuée, en considérant l'action comme effectuée.
5. Sélectionner, entre tous les choix possibles des actions précédentes, l'action de maintenance qui apporte le meilleur rapport $\frac{\triangle R}{\text{Coût}}$ au système, où $\triangle R$ est l'augmentation de fiabilité avant et après la maintenance.
6. Réaliser l'action de maintenance.
7. Comparer de nouveau la fiabilité estimée avec la fiabilité référence et, si besoin, reprendre à l'étape 4.

Le processus proposé est divisé en trois parties (Fig. 3.5). L'une d'elles consiste, à l'aide du modèle du système, à estimer la fiabilité. Elle s'appuie sur l'état courant du système, c'est-à-dire l'âge des composants et les signaux présents tels que des alarmes. Cette estimation probabiliste est évaluée au moment de l'intervention à l'instant t et vise à déterminer la

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

fiabilité du système à la fin de sa mission et donc de calculer la fiabilité de la mission ; on appelle :

- $R(Mission)$: Fiabilité de la mission.
- R_{sp} : Fiabilité référence.
- d : Durée de la mission.

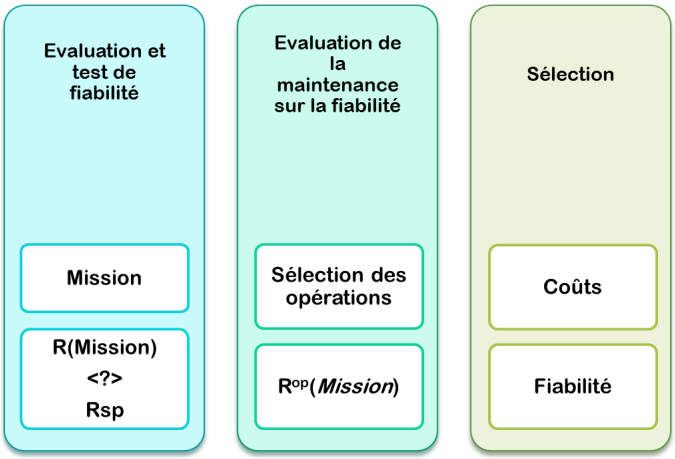


FIGURE 3.5 – *Les étapes du processus*

Cette évaluation est basée sur le principe de la fiabilité conditionnelle puisqu'elle intègre l'état courant du système, y compris l'état de signaux particuliers tels que le déclenchement d'alarme. L'évaluation de la fiabilité du système en fin de la mission permet sa comparaison à celle de référence représentée par la valeur spécifiée de fiabilité R_{sp}, valeur fixée sur la base des exigences de l'utilisateur.

A partir de toutes ces données, on peut construire le diagramme suivant, avec lequel on décrit le processus de la prise de décision à partir de l'état du système et les conditions associées de la mission (Imam, Conrard, & Bayart, 2012). Les deux autres parties du processus sont décrites dans les sections suivantes.

3.3.2 Évaluation de la fiabilité

L'analyse de fiabilité possède un large champ d'applications dans les domaines d'ingénierie. Dans notre cas, il s'agit de comparer la performance prévue du système avec des critères de référence pour identifier les faiblesses éventuelles. L'évaluation de la fiabilité peut être mise en œuvre par l'utilisation de techniques soit qualitatives soit quantitatives. Les techniques qualitatives ne visent pas à l'évaluation exacte de la fiabilité, mais plutôt à déterminer ou à classer les éléments ou composants les plus critiques vis-à-vis de la fiabilité et qui méritent une surveillance accrue. Alors que les méthodes quantitatives utilisent des approches statistiques et visent à une quantification exacte de la probabilité de défaillance

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

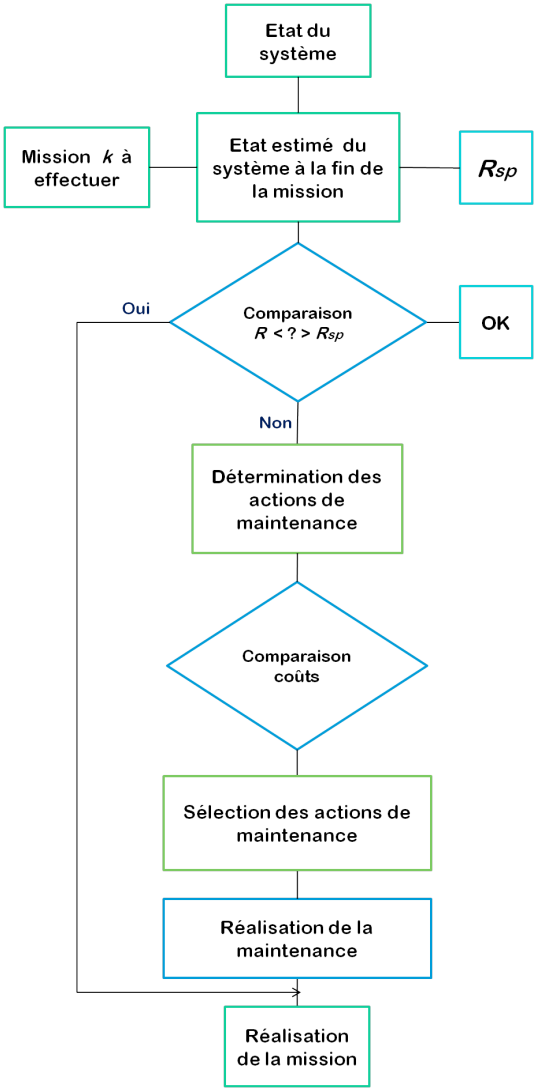


FIGURE 3.6 – *Processus de la prise de décision*

pour ensuite, éventuellement, l'utiliser comme élément de prise de décision.
Si on considère les variables x_i comme des variables aléatoires ; et si l'évolution de ces variables $x_1, ..., x_n$ est indépendante, on peut définir la fiabilité élémentaire par la probabilité d'être en bon état de fonctionnement :

$$R = Pr(\Phi(\vec{x}) = 1) \tag{3.7}$$

La fiabilité classique est une fonction basée sur le temps, et peut être définie par :

$$R(t) = Pr\{t_f > t\} = 1 - Pr\{t_f \leq t\} = 1 - F(t) \tag{3.8}$$

Le variable aléatoire t_f est la date de l'instant de la défaillance, t est le temps courant. Ainsi, la fiabilité est la probabilité que le système soit dans un état de bon fonctionnement pendant une durée de temps (dans la figure c'est [0, t]) (Fig. 3.7).

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

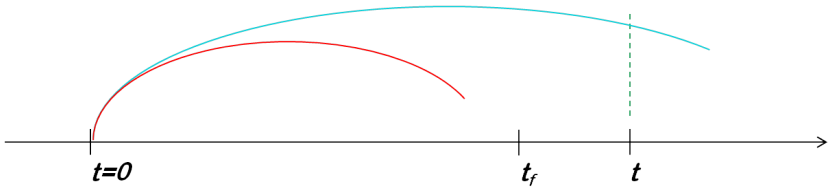


FIGURE 3.7 – *Définition de la fiabilité*

La probabilité qu'un système soit en bon état à l'instant t_2 sachant qu'il était en bon état de fonctionnement à l'instant $t_1 (< t_2)$, est dénommée ici fiabilité conditionnelle $R(t_2|t_1)$. Appliquée à l'activité de maintenance, cette fiabilité conditionnelle permet d'estimer lors d'une maintenance effectuée à la date t_1 qu'un système soit en bon état, la fiabilité de la mission, c'est-à-dire la probabilité que le système soit toujours en bon état à la fin de la mission à la date t_2. La fiabilité conditionnelle évalue donc un bon de fonctionnement du système aux deux instants t_1 et t_2. La fiabilité conditionnelle est définie par :

$$R(t_2|t_1) = Pr(\text{Système non-défaillant à } t_2 \mid \text{Système non-défaillant à } t_1)$$

$$R(t_2|t_1) = Pr\left\{t_f > t_2 | t_f > t_1\right\} \tag{3.9}$$

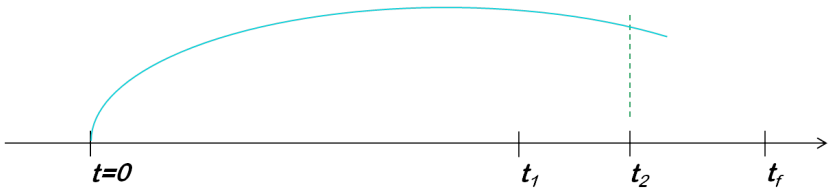


FIGURE 3.8 – *Fiabilité conditionnelle*

Cela peut être calculé par :
$R(t_2|t_1) =$

$$\frac{Pr(\text{Système non-défaillant à } t_2 \cap \text{Système non-défaillant à } t_1)}{Pr(\text{Système non-défaillant à } t_1)}$$

$$= \frac{R(t_2)}{R(t_1)} \tag{3.10}$$

La fiabilité de chaque composant peut être évaluée selon la modalité des lois de défaillances et les probabilités de défaillances des composants, et plus généralement, selon la probabilité de défaillance du système qui les contient, mais aussi selon la structure du système résultant global. Les taux de défaillances sont issus des données de retour d'expérience des composants et du recueil de données de fiabilité (NF EN 62308 - NF EN 62211).

$$F(t) = \int_0^t f(x)dx \tag{3.11}$$

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

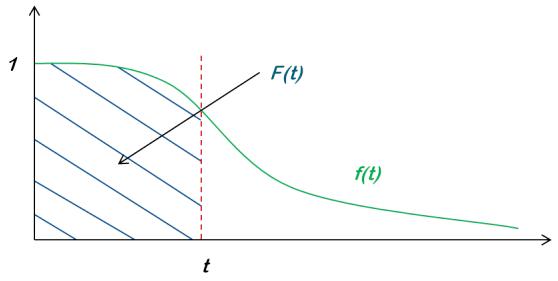


FIGURE 3.9 – *Densité de défaillance, et fonction de répartition*

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(x)dx \tag{3.12}$$

Dans le cas général et selon les interdépendances entre les composants du système, la relation pour l'évaluation de la fiabilité globale peut être établie. Cette relation est souvent issue d'un modèle fonctionnel du système construit par la décomposition de la structure en sous-systèmes simples à différents niveaux jusqu'à l'obtention d'une disposition parallèle ou série des composants. L'application des expressions de calcul de la fiabilité de ces sous-systèmes de base permet ensuite d'évaluer la fiabilité du système résultant $\mho$. La figure (Fig. 3.10) présente les systèmes typiques les plus souvent utilisés. Les relations suivantes permettent d'obtenir la fiabilité de chaque structure ; on considère dans cette figure que chaque structure est composée de n composants.

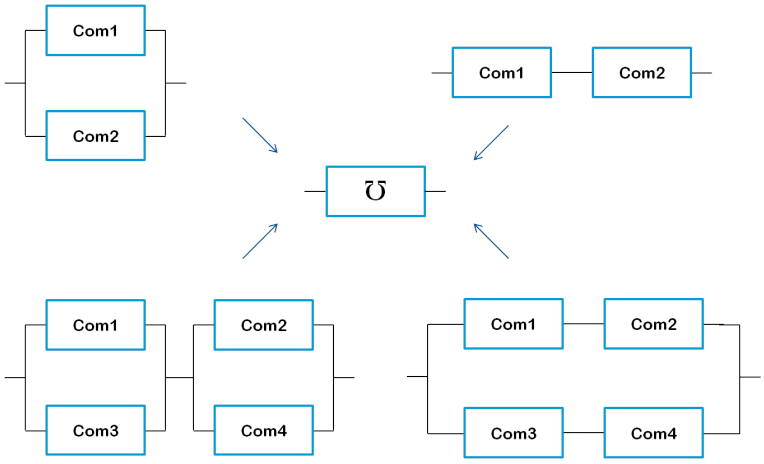


FIGURE 3.10 – *Sous-structures de base*

Système en parallèle	$R_{sys}(t) = 1 - \prod_{i=1}^{n}[1 - R_i(t)]$
Système en série	$R_{sys}(t) = \prod_{i=1}^{n} R_i(t)$
Système P-S	$R_{sys}(t) = \prod_{i=1}^{n}\left(1 - \prod_{j=1}^{m}[1 - R_j(t)]\right)$
Système S-P	$R_{sys}(t) = 1 - \prod_{j=1}^{m}\left(1 - \prod_{i=1}^{n}[R_j(t)]\right)$

© 2015 Tous droits réservés.

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Défaillance du système pendant une mission prédéfinie

Après cette première approche de la fiabilité conditionnelle, on s'intéresse ici à l'évaluation de la fiabilité d'une mission. Une première étape est la détermination de la relation entre l'état des composants et celui du système. On peut utiliser pour représenter le système, un modèle graphique décrivant les liens entre composants et l'effet de leur panne sur le système. Les modèles les plus classiques sont les diagrammes de fiabilité et les arbres de défaillance. Indirectement, ces représentations permettent de définir la fonction $\Phi(\vec{x})$. De cette représentation ou de la connaissance de $\Phi(\vec{x})$, la fiabilité durant une période de temps d peut être évaluée. Cette période d correspond à la durée d'une mission définie par le concepteur ou l'utilisateur du système. Le fonctionnement pendant la mission doit être suffisamment sûr pour que le système puisse fournir le service pour lequel il a été conçu avec un niveau de sûreté ou de risque choisi R_{sp}.
Le principe de maintenir un système dans un état de bon fonctionnement pour une mission donnée impose l'évaluation d'une fiabilité conditionnelle (Fig. 3.11). Pour un système à l'instant t qui doit accomplir une mission de durée de temps d, la probabilité de pouvoir arriver à la fin de la mission $t+d$ en bon état est calculée de la façon suivante (Imam, Conrard, & Bayart, 2012) :

$$R(S[t:t+d]) = Pr(\text{Système est OK à } t+d | \text{Système est OK à } t) \quad (3.13)$$

Cela donne :

$$R(S[t:t+d]) = \frac{Pr(\text{Système OK à } t+d \cap \text{Système OK à } t)}{Pr(\text{Système OK à } t)} \quad (3.14)$$

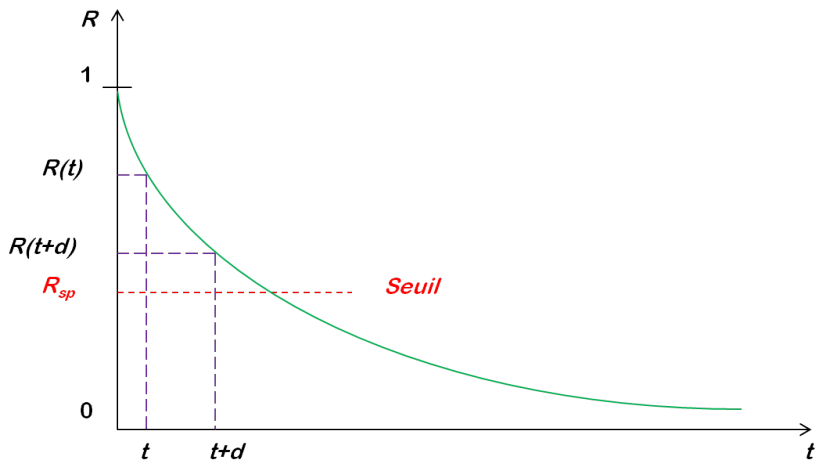


FIGURE 3.11 – *Évaluation de fiabilité pour un système pour une mission de durée d*

Pour mieux expliquer le principe, on considère comme exemple un système à deux composants dont la structure est représentée à la figure

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

ci-après (Fig. 3.12). Ces composants sont installés dans une structure de redondance active. La seconde partie de la figure présente également ce système sous la forme d'un modèle d'arbre des défaillance qui décrit la défaillance de la mission du système suite à la panne des composants alors que le système était en état de fonctionner au début de la mission à t.

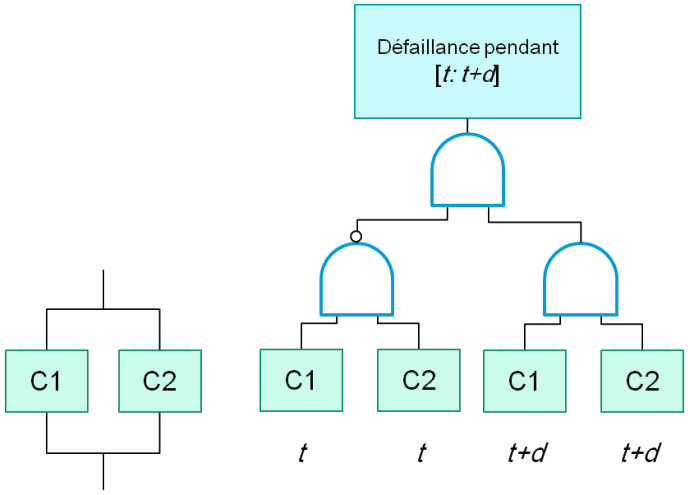


FIGURE 3.12 – *Représentation de la défaillance du système à deux composants en redondance pour une mission d*

Ainsi, le système fournit son service si au moins un composant est en bon état de fonctionnement. On considère que la mission du système démarre à l'instant t et pendant une durée de temps d. Le système accomplit correctement sa mission lorsque au moins un composant est en bon état de fonctionnement au début de la mission et à la fin de la mission. Une défaillance du système se produit pendant la durée de la mission entre t et $t+d$, si les deux composants sont en panne à la fin de la mission, alors qu'au moins un composant était en bon état au début de la mission. Le tableau ci-dessous (3.1) montre les différents cas possibles de chaque composant et du système global. Il est important à noter que dans ce tableau on représente la défaillance du système comme mentionné dans la figure précédente (Fig. 3.12), donc j'ai utilisé la notation HS pour V dans le même tableau, et la notation OK pour F dans le même tableau (3.1).

$$\begin{array}{rlll} \text{Défaillance } [t:t+d] \Leftrightarrow & C_1 & \text{est HS à} & (t+d) \\ \cap & C_2 & \text{est HS à} & (t+d) \\ \cap & C_1 \cup C_2 & \text{est OK à} & (t) \end{array}$$

Dans le cas général, et selon le modèle d'un système composé de n composants, le fonctionnement du système sera examiné à t et à $t+d$, cela permet ensuite d'évaluer la capacité du fonctionnement du système global sur l'ensemble de la mission d.

La figure (Fig. 3.13) représente le cas général d'un système quelconque, les composants du système sont inter-connectés d'une certaine manière

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

TABLE 3.1 – *Cas possibles d'un système à deux composants pour une durée de temps d*

t		t+d		
C_1	C_2	C_1	C_2	SYS
OK	OK	OK	OK	OK
OK	OK	OK	HS	OK
OK	OK	HS	OK	OK
OK	HS	OK	HS	OK
HS	OK	HS	OK	OK
OK	OK	HS	HS	HS
OK	HS	HS	HS	HS
HS	OK	HS	HS	HS

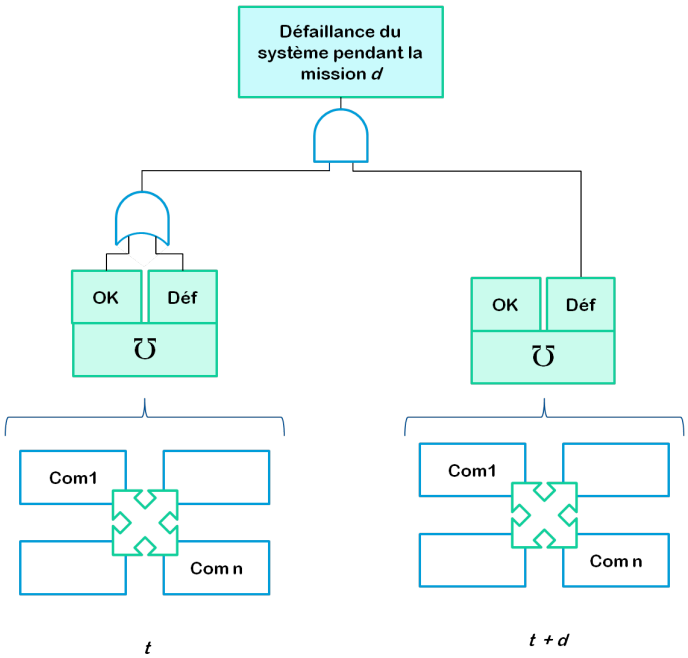


FIGURE 3.13 – *Dans le cas général, la représentation de la défaillance du système résultant ℧ entre t et t + d*

quelconque, à partir de cette configuration et cette disposition des n composants, on peut définir un système résultant ℧ qui peut être défaillant (Déf) ou non-défaillant (OK). Cela permet par la suite de présenter la défaillance de tel système pendant $[t : t + d]$.

3.3.3 Processus de détermination optimale des actions de maintenance

On avait mentionné précédemment que le processus de détermination des actions optimales de maintenance est divisé en trois parties principales. La fiabilité de la mission, selon les états probables du système, doit être comparée à une valeur limite R_{sp}. Selon la valeur de fiabilité estimée à partir du modèle du système, le système peut être considéré "valide" ou non selon sa capacité à accomplir sa mission (Fig. 3.14). On considère le

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

système comme valide s'il est en bon état de fonctionnement au début de sa mission et qu'il pourra la mener jusqu'à la fin avec le risque fixé. La valeur de fiabilité requise du système doit être, ainsi, supérieure au niveau de fiabilité référence. Dans ce cas, le système sera capable de fonctionner correctement jusqu'à la fin de la mission (avec un niveau de risque connu).

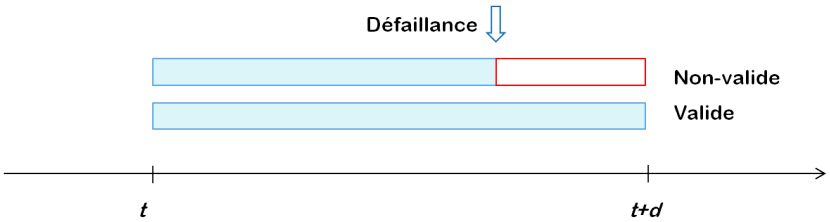


FIGURE 3.14 – *Validation du système pour une mission entre t et t + d*

En revanche, si la valeur de fiabilité est inférieure à la valeur de référence R_{sp}, l'utilisateur du système doit effectuer, avant de démarrer, des actions afin de rendre le système capable d'accomplir sa mission. Plusieurs actions de maintenance peuvent être proposées telles que l'inspection, le remplacement, le nettoyage, lubrification, etc. Chaque action parmi les actions proposées a son impact (si appliquée) sur la fiabilité du système, et bien évidemment chaque intervention proposée exige des coûts de maintenance et d'arrêt différents. Le processus d'optimisation intervient ici dans la prise de décision sur la tâche à effectuer.

Je précise ici que dans ma thèse je considère des systèmes dont les défaillances sont catalectiques. Dans d'autres systèmes, certaines actions de maintenance sont appliquées suite à une usure ou dégradation des éléments du système (surtout pour des systèmes mécaniques), telle que la lubrification, le nettoyage ou le graissage ; pour ces actions, l'influence sur la fiabilité sera évaluée selon les données fournies par le constructeur du composant, ou bien selon les études effectuées dans ce sens là. On prend par exemple la fiabilité d'un roulement pour une durée L (ou l'âge) exprimée en fonction de la durée de vie de référence L_{10} et pour $\beta \simeq 1.5$ [SNR].

$$R = exp\left[ln0.9(\frac{L}{L_{10}})^{\beta}\right] \tag{3.15}$$

La durée nominale de vie L_{10}, ou la durée de vie de référence, est une estimation de la performance, elle est déterminée dans les normes pour une fiabilité de 90%, ou bien à une probabilité de défaillance de 10%. Après une action de lubrification, cette valeur va être corrigée par un facteur de correction de durée a_{iso} introduit par la norme internationale ISO 281. L_n représente la nouvelle valeur après exécuter l'opération, et qui

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

permet ensuite d'estimer la nouvelle valeur de fiabilité après correction grâce à la relation (3.15) précédente.

$$L_n = a_1 a_{iso} L_{10} \qquad \text{où;} \quad a_1 = \frac{L}{L_{10}} \tag{3.16}$$

Le coefficient a_{iso} permet d'estimer l'influence de la lubrification sur la durée nominale, et donc sur la fiabilité du système [SNR] ; cela peut représenter un rapport de viscosité entre une valeur souhaitée et une valeur mesurée [SKF].

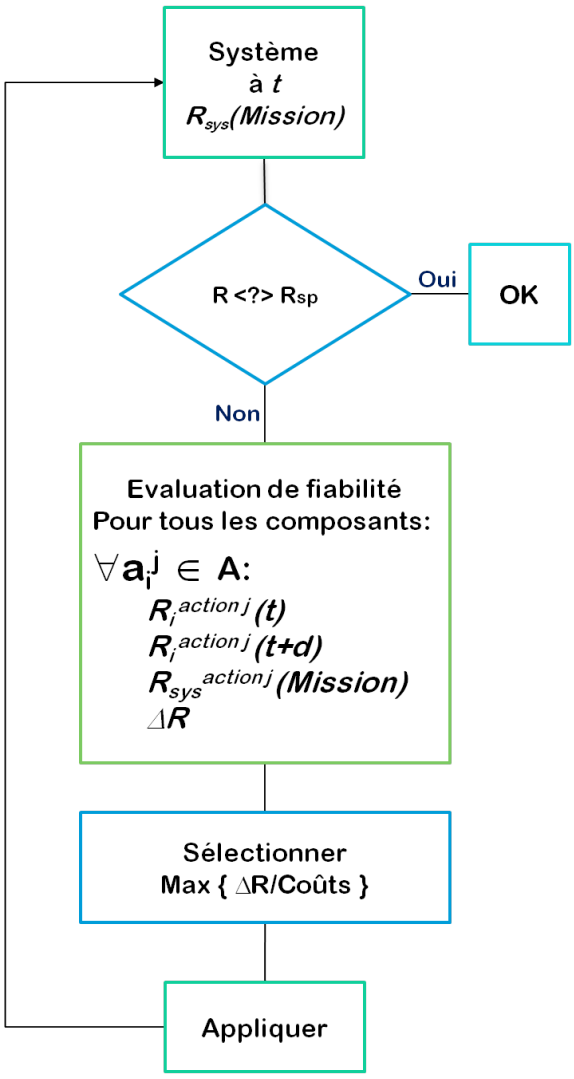


FIGURE 3.15 – *Démarche d'optimisation*

Plus formellement, l'ensemble de toutes les actions possibles à appliquer sur le système est $\{A\} = \{a_1, a_2, a_3, ..., a_n\}$, où $n \in \mathbb{N}$ est le nombre des composants du système, et $\{a_i\} \in A$ est un sous-ensemble qui contient $m_i \in \mathbb{N}$ actions possibles à appliquer sur le composant c_i, avec $1 \leq i \leq n$. On considère que le coût de chaque action proposée est $C_i^j > 0 ; 1 \leq j \leq m_i$. (Je précise que j est lié au composant i, donc cela doit

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

être cité comme j_i , j'ai utilisé juste j pour simplifier les notations) ; le coût de chaque composant est C_i, cette valeur de coût est considérée donnée pour la nature et les conditions de chaque action. Ainsi, l'application de chaque action a_i^j permet d'améliorer la fiabilité du composant c_i à une valeur R_i^j suite à une nouvelle valeur de taux de défaillances λ_i^j survenue de la réalisation de l'action. On définit $\{a_i\}$ donc par :

$$\text{Actions sur le composant } c_i = \begin{cases} a_i^1 \text{ Action 1} & R_i^1 & C_i^1 \\ a_i^2 \text{ Action 2} & R_i^2 & C_i^2 \\ \dots & & \\ a_i^{m_i} \text{ Action } m_i & R_i^{m_i} & C_i^{m_i} \end{cases}$$

Cette approche peut être illustrée par la figure (Fig. 3.15) avec l'algorithme correspondant ci-après. Dans cet algorithme, nous avons mentionné que la nature de la loi de défaillance est libre. L'algorithme est toujours opérationnel et adaptatif quelle que soit la loi utilisée. Chaque composant c_i du système, possède un taux de défaillance λ_i, qui permet d'évaluer la probabilité de panne du composant $R_i(t)$ au début de la mission, et $R_i(t+d)$ à la fin de la mission. Ces deux fiabilités sont estimées selon la structure du système et en appliquant les lois de fiabilité choisies. Elles permettent d'évaluer la fiabilité du système $R_{sys}(t)$ à l'instant t, et $R_{sys}(t+d)$ à $t+d$. Cette condition de fonctionnement sur la totalité de la mission d permet donc d'évaluer la fiabilité du système sur la mission $R_{sys}(Mission)$. On précise maintenant que le concepteur du système dispose suffisamment d'informations concernant l'ordonnancement des missions, la date de début de chaque mission, et la durée de chaque mission d_k ; $k \in \mathbb{N}$, avec k est l'indice de la mission. Après avoir présenté l'approche typique d'évaluation de la fiabilité des structures, on présente l'expression de la fiabilité sur la mission de la façon suivante, en considérant le principe illustré dans la figure (Fig. 3.11) :

$$R_{sys}(Mission_k) = Pr(\text{Système est OK à } t+d_k | \text{ Système est OK à } t) \quad (3.17)$$

$$R_{sys}(Mission_k) = \frac{Pr(\text{Système OK à } t+d_k \cap \text{Système OK à } t)}{Pr(\text{Système OK à } t)} \quad (3.18)$$

$$R_{sys}(Mission_k) = \frac{R_{sys}(t+d_k)}{R_{sys}(t)} \quad (3.19)$$

L'étape ultérieure comporte la comparaison entre la fiabilité du système sur la mission $R_{sys}(Mission_k)$, et la fiabilité référence R_{sp}. Si $R_{sys}(Mission_k) > R_{sp}$, on considère que le système est capable d'effectuer la mission entre t et $t+d_k$ sans problème (plus précisément, avec le niveau de risque fixé par R_{sp}). En revanche, si $R_{sys}(Mission_k) < R_{sp}$, le système nécessite une opération de maintenance avant d'effectuer la mission pour garantir le niveau requis de la sûreté de fonctionnement. Après

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

cette décision, toutes les actions de maintenance possibles $\{A\}$ sont proposées, parmi ces actions, l'ensemble $\{a_i\} \subset \{A\}$ concerne un composant c_i, et chaque action $a_i^j \subset \{a_i\}$ est une action de maintenance possible à effectuer sur le composant c_i.

Considérant un changement effectué par chaque action, la fiabilité du composant concerné R_i va être modifiée en R_i^j, ceci conduit à modifier la fiabilité du système en R_{sys}^j. Selon la condition de fonctionnement sur la mission, les deux fiabilités $R_{sys}^j(t)$ et $R_{sys}^j(t + d_k)$ permettent d'évaluer la fiabilité du système sur la mission après le changement $R_{sys}^j(Mission_k)$. La différence entre les deux valeurs de fiabilité du système avant et après la réalisation de l'action $\triangle R$ est donc donnée par :

$$\triangle R = R_{sys}^j(Mission_k) - R_{sys}(Mission_k) \tag{3.20}$$

A l'étape de sélection, l'algorithme cherche, entre tous les actions proposées, l'action qui a le meilleur rapport (Fiabilité/Coûts), c'est à dire le $max\{\frac{\triangle R}{\text{Coûts}}\}$. Le coût comporte le coût de chaque action C_i^j et le prix de composant en cas de changement de composant. Après l'étape de sélection, cette action sera appliquée sur le composant indiqué c_i.

Enfin, si le but n'est pas encore atteint (le niveau de fiabilité après le changement n'a pas augmenté au niveau requis), un deuxième cycle est réalisé et une deuxième action de maintenance est proposée, et ainsi de suite. Dès que la fiabilité du système augmente au dessus de la fiabilité requise, le système est considéré comme capable de réaliser sa fonction jusqu'à la fin de la mission d_k. De cette démarche, une liste des actions de maintenance préventive proposées est fournie.

On avait expliqué dans les hypothèses du deuxième chapitre (2.2.3) que la décision effectuée à chaque intervention pour la maintenance a des aspects dynamiques sur la fiabilité du système. Chaque action possible a un impact direct sur la fiabilité. Après la sélection de chaque action dans la liste, la fiabilité de la mission va être réévaluée et comparée à la fiabilité référence. Ceci est représenté dans la figure (Fig. 3.15) avec la boucle de retour de l'algorithme A. Les actions proposées influent, également, sur la décision des actions suivantes lors de la même intervention. La figure suivante (Fig. 3.16) explique le principe. Le résultat de comparaison est un facteur prépondérant dans la décision des autres actions.

La méthode développée permet de déterminer la meilleure action de maintenance à effectuer (du point de vue des critères), pour permettre à un système d'effectuer une mission dans des conditions de fiabilité données.

Si on s'intéresse à un ensemble de missions qui sont exécutées tout au long de la vie d'un système, on peut, à partir de l'algorithme développé, déterminer quelles seront les actions de maintenance à effectuer en tenant

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Algorithme A :

Entrées
n : Nombre des composants du système
$\mho$: Structure du système
λ_i : Taux de défaillances du composant c_i $\quad 1 \leq i \leq n$
m_i : Nombre des actions possibles à appliquer au composant c_i
$\{A\}$: Ensemble de toutes les actions
$\{a_i\}$: Sous-ensemble des actions possibles à appliquer au composant c_i
R_{sp} : Fiabilité référence
d_k : Durée de la mission k
C_i^j : Coût de l'action j appliquée au composant c_i $\quad 1 \leq j \leq m$

Loi de fiabilité
Toute loi de fiabilité

Étape 1
Évaluer $R_{sys}(Mission_k)$
$\left.\begin{array}{l}\mho \\ \text{loi de fiabilité}\end{array}\right\}$ $R_{sys}(Mission_k) =$
$Pr(\text{Système est OK à } t + d_k | \text{ Système est OK à } t)$

Étape 2
Comparer $R_{sys}(Mission_k) > ? R_{sp}$

if $R_{sys}(Mission_k) > R_{sp}$ then
  Système est Ok
  Goto Étape 4
Else
  Évaluer $R_{sys}^j(Mission_k)\,|_i$
    For $i = 1$ to n
      For $j = 1$ to m_i
        $R_{sys}^j(Mission_k)\,|_i$
        Calculer $\triangle R_i^j$
        Calculer $\text{Coûts}_i^j = C_i^j$
      Next
    Next
End if

Étape 3
Sélectionner
$\max\{\frac{\triangle R}{\text{Coûts}}\}_i^j$
Output
  Actions proposées à la date t $\{a_i^j\}$
  Composant concerné i
  Goto Étape 1

Étape 4
Output
  Pas d'action
  k=k+1

compte de la fiabilité initiale du système. On obtient ainsi un plan de maintenance préventive.

L'algorithme proposé peut donc aussi être utilisé au niveau de la

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

FIGURE 3.16 – *Impact direct des actions proposées sur la décision des actions suivantes selon la fiabilité*

conception du système pour déterminer l'architecture optimale, c'est à dire celle qui donne le moindre coût en considérant les aspects architecture initiale et maintenance tout au long de la vie du système (Imam, Conrard, & Bayart, 2013).

3.4 Méthode de sélection de l'architecture optimale du système

Comme la performance des systèmes se dégrade progressivement avec l'âge, il est nécessaire de le restaurer et de le maintenir à un niveau spécifique, ce qui permet au système de remplir sa mission définie. Cet objectif pourrait être atteint par la réalisation de certaines opérations de maintenance préventive pendant la durée de vie utile du système. Ce fait impose, comme déjà mentionné, une multiplication des dépenses consacrées à la maintenance surtout si ces opérations n'étaient pas bien planifiées. La complexité de l'architecture des systèmes peut jouer un rôle négatif en ce qui concerne les frais supplémentaires de maintenance, mais en même temps, la complexité est demandée pour surmonter les défis de production et du marché et peut augmenter la sûreté des systèmes. La détermination de choisir une telle architecture doit être fortement justifiée ; dans cette section, la méthode de détermination de la structure optimale du système est expliquée, elle permet d'assurer la mission au niveau de sûreté requis et avec le maximum possible d'économie en ce qui concerne les frais de maintenance. Cette architecture est sélectionnée en fonction de la meilleure contribution de telle structure dans le processus d'optimisation des actions de maintenance sous les mêmes conditions de sûreté et pour la même mission.

Dans la figure (Fig. 3.17), à titre d'exemple simplifié, le problème consiste à sélectionner l'architecture du système St_x capable de réaliser les missions avec le moindre coût de maintenance sur l'ensemble de sa

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

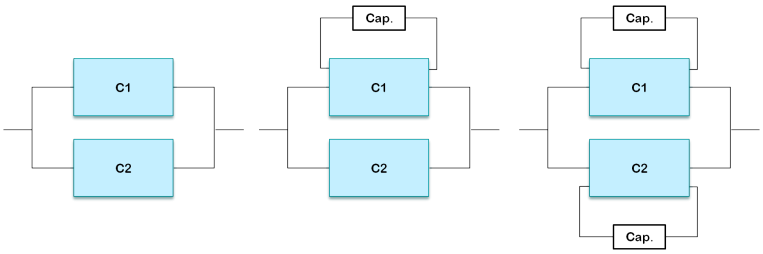


FIGURE 3.17 – *Problème de détermination de l'architecture optimale*

durée de vie ; avec x l'indice de l'architecture, C_{St_x} le coût de l'architecture x, et Coûts$_x$ est le coût de maintenance sur l'ensemble de la vie utile de l'architecture x estimé à l'aide de la méthode de sélection des actions optimales ; il est intéressant de mentionner ici que le coût de l'architecture C_{St_x} devient négligeable si la durée de vie du système est convenablement étendue :

$$St_x \begin{cases} C_{St_x} \\ Coûts_x \end{cases}$$

$$St_1 \begin{cases} C_{St_1} \\ Coûts_1 \end{cases} \qquad St_2 \begin{cases} C_{St_2} \\ Coûts_2 \end{cases}$$

$$\text{Structure optimale} \equiv \quad min(C_{St_x} + Coûts_x)$$

Dans ce travail, on s'intéresse particulièrement à la conception des systèmes de contrôle commande sûrs de fonctionnement. On considère des problèmes qui exigent d'intégrer un capteur dans la structure du système. Cela peut rendre efficace le processus de la prise de décision pour la maintenance et permet de détecter les états de dysfonctionnement du système. Le capteur est capable de détecter les défauts des composants et de rendre le système plus robuste et sûr de fonctionnement, mais en revanche, la complexité additionnelle menée par la modification de l'architecture a ses inconvénients qui peuvent être au niveau des coûts de conception ou de maintenance de ces composants ajoutés.

Lors de la détection d'un défaut des composants, le capteur est capable de fournir une alarme. Cette tolérance aux défauts permet de multiplier la capacité de rendre le service du système (une possibilité de plus pour continuer le fonctionnement avec la présence d'une alarme mais sans défaillance de l'ensemble du système). Cette information supplémentaire sera transposée en mode probabiliste dans la relation suivante. Le système est capable de fournir son service pendant la mission malgré la défaillance de certains composants.

$$R_{sys}(Mission_k) = Pr(\text{Système est OK à } t + d_k | \text{ Système est OK à } t) \quad (3.21)$$

$$R_{sys}(Mission_k) = \frac{Pr(\text{Système OK à } t + d_k \cap \text{Système OK à } t)}{Pr(\text{Système OK à } t)} \quad (3.22)$$

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Le concepteur est présumé proposer plusieurs architectures $St_1, St_2, ..., St_r$ à différents niveaux de complexité. Chaque architecture est capable de répondre à certaines exigences et de satisfaire certains buts de conception. Parmi ces architectures, il y a celles qui peuvent assurer les missions requises avec le niveau souhaité de fiabilité. La sélection de la meilleure conception est basée sur la meilleure contribution de telle architecture dans la minimisation des coûts globaux de maintenance sur l'ensemble de la durée de vie du système.

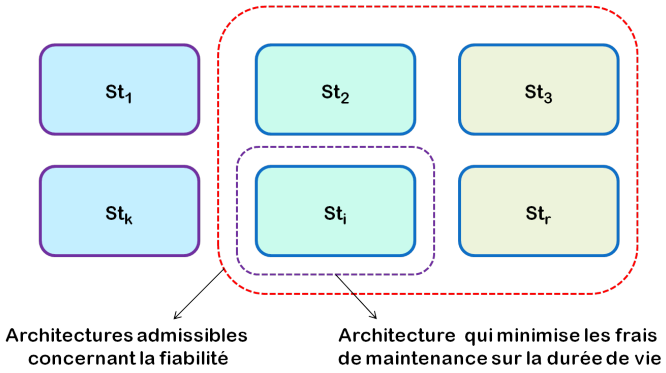


FIGURE 3.18 – *Sélectionner l'architecture optimale*

L'évaluation de la fiabilité du système sur l'ensemble des missions $R_{sys}^{St_x}(Mission_k)$ pour chaque architecture St_x, permet ensuite de comparer le niveau de fiabilité au niveau souhaité R_{sp} comme première étape dans l'algorithme de détermination des actions de maintenance. En appliquant cette démarche, et pour chaque architecture St_x, on obtient la liste des actions de maintenance $main_x$ déterminées à chaque intervention et pour un ensemble des missions $\sum d_k$ et un niveau de fiabilité R_{sp}. La liste des actions déterminées permet de calculer le coûts de maintenance Coûts_x sur l'ensemble de la vie utile. Chaque politique de maintenance contribue à améliorer la fiabilité du système sur l'ensemble de sa durée de vie, et avec la méthode de détermination des actions de maintenance, on garantit la fiabilité maximale qu'on pourrait atteindre après la maintenance de chaque intervention chaque architecture est capable de déterminer ce niveau de fiabilité maximale $R_{max}^{x}(\sum d_k)$ selon la disposition de ses composants et la politique de maintenance proposée.

$$\begin{array}{llll} St_1 & C_{St_1} & Coûts_1 & R_{max}^{1}(\sum d_k) \\ St_2 & C_{St_2} & Coûts_2 & R_{max}^{2}(\sum d_k) \\ & \ldots & & \ldots \\ St_r & C_{St_r} & Coûts_r & R_{max}^{r}(\sum d_k) \end{array}$$

L'étape suivante constitue en la sélection de l'architecture optimale, celle qui est capable de fournir le service, avec le niveau souhaité de sûreté, et avec le maximum possible d'économie en ce qui concerne les coûts

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

de conception et les frais de maintenance $min(C_{St_x} + \text{Coûts}_x)$. Une simulation à long terme de la méthode va permettre de comparer, durant la vie utile du système, le comportement de chacune des architectures en ce qui concerne les défaillances et l'arrêt du système tout au long de la vie, mais aussi les actions de maintenance effectuées (quelles actions, et quelles fréquence) (Imam, Conrard, & Bayart, 2013), les dépenses causées suite à ces opérations et les bénéfices faits suite à l'augmentation de fiabilité du système après chaque intervention. Il est impératif de mentionner ici que cette solution (l'architecture sélectionnée), n'est pas forcément la solution optimale mais une solution proche de l'optimale, on élimine d'une manière efficace les solutions les plus chères. L'approche est décrite dans l'algorithme suivant qui sera présenté dans la figure (Fig. 3.19) ; dans l'algorithme, le coût de maintenance est composé des coûts suivants dont les significations sont évoquées dans la même figure.

$$\text{Coûts}_x = C_x\{a_i^j\} + C_x\{D\} + C_x\{c_i\}$$

où ;

- $C_x\{a_i^j\}$ coûts des actions.
- $C_x\{D\}$ coûts des défaillances.
- $C_x\{c_i\}$ coûts des composants.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Algorithme B :

Entrées
n_i : Nombre des composants du système
$\mathfrak{V}_i$: Structure et décomposition du système
C_{st_i} : Coûts de structure
m_i : Nombre des actions possibles à appliquer au composant c_i
$\sum d_k$: L'ensemble de toutes les missions
R_{sp} : Fiabilité référence

Étape 1 Proposition des architectures

$$St_1 \begin{cases} n_1 \\ m_1 \\ C_{St_1} \\ \mathfrak{V}_1 \end{cases}$$

$$St_2 \begin{cases} n_2 \\ m_2 \\ C_{St_2} \\ \mathfrak{V}_2 \end{cases}$$

...

$$St_r \begin{cases} n_r \\ m_r \\ C_{St_r} \\ \mathfrak{V}_r \end{cases}$$

Étape 2 Validation des architectures

$$St_x | \sum d_k \wedge R_{sp}$$

Étape 3 Algorithme A pour $\sum d_k$

$$\{main_x|_k\}$$

$$\text{Coûts}_x$$

Étape 4 Sélection

$$St^* \Leftrightarrow min(\text{Coûts} + C_{St})$$

Sorties St^*
Fin

3.5 Conclusion

A partir de ce qu'on a présenté dans ce chapitre, la maintenance préventive assure une base de compromis entre les coûts des activités de maintenance et les bénéfices réalisés. Ces derniers consistent en la réduc-

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

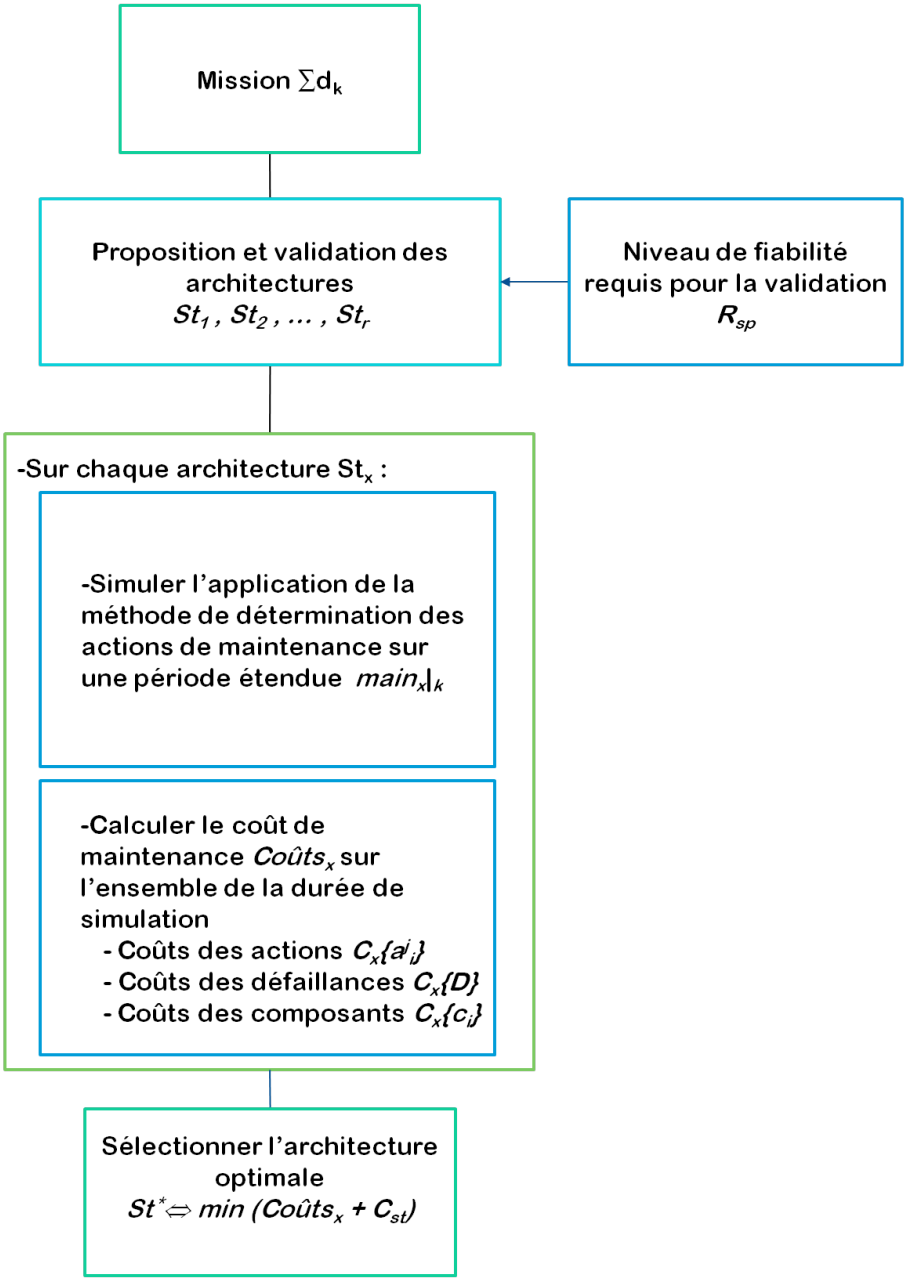


FIGURE 3.19 – *L'algorithme du processus de conception, je re-précise que les coûts d'action, de défaillance et le prix de composant sont déjà fournis*

tion du taux d'occurrence de défaillances afin d'augmenter la fiabilité du système ; les concepteurs visent à maximiser la fiabilité des systèmes sous certaines contraintes de coûts. D'autres considérations peuvent être prises en compte lors de la conception comme la disponibilité et la sécurité.
Le troisième chapitre a présenté, en première partie, la méthode de détermination des actions de maintenance ; ces actions sont proposées pour être appliquées aux composants qui nécessitent véritablement une intervention préventive avant le début de la mission. La durée de la mission du système est considérée connue pour chaque intervention. La séquence de

© 2015 Tous droits réservés.

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

ces actions de maintenance est établie d'une manière qui permet d'avoir le meilleur compromis (Fiabilité/Coûts) à l'aide de l'algorithme proposé, l'ordre des actions dans la liste est important pour assurer un meilleur niveau de fiabilité et assurer la mission. Ce niveau de fiabilité représente une contrainte de sûreté de fonctionnement.

Dans un deuxième temps, cette méthode de détermination des actions de maintenance constitue la base de décision pour sélectionner une architecture optimale, qui sera capable de répondre aux exigences d'exploitation et d'utilisation du système. Chaque architecture proposée porte une modification dans la structure (une certaine complexité de la capacité de tolérance aux défauts) qui lui permettra d'effectuer la mission avec un certain niveau de certitude. La sélection de cette architecture optimale est basée sur la meilleure contribution de la modification effectuée dans la réduction des frais de maintenance tout au cours de la vie utile du système. D'un certain point de vue, cette méthode ne sera pas "optimale", mais on garantit d'une manière efficace l'élimination des solutions les plus chères.

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

4 Applications et exemples de la méthode de décision

Sommaire

Ce chapitre présente, dans un exemple issu du milieu industriel, le développement mathématique et la représentation numérique de la méthode de conception, qui vise à déterminer une architecture optimale du système dépendant de l'optimisation des actions de maintenance tout au long de la vie utile du système.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

4.1 Le convoyeur pneumatique

Afin de d'illustrer la méthode de conception développée dans la thèse, elle sera appliquée à un exemple issu de l'industrie. La méthode vise à déterminer l'architecture optimale du système d'un convoyeur pneumatique ; le système est destiné à effectuer des missions diverses sur l'ensemble de sa durée de vie. Ces missions sont prédéfinies par le concepteur ou l'utilisateur du système en terme de fiabilité et la durée de la mission. Les activités possibles lors de chaque intervention sont connues, pour chaque composant : remplacement, inspection ou remplacement conditionné (inspection suivie par un remplacement si nécessaire). Une liste des actions optimales sera déterminée pour chaque intervention et pour une architecture donnée. La comparaison de ces listes est alors utilisée dans la méthode pour finalement sélectionner l'architecture optimale, vis-à-vis de l'activité de maintenance.

4.1.1 Description du système

Dans cet exemple on considère l'unité d'aspiration dans un convoyeur pneumatique, qui utilise la technique de séparation des particules basée sur la densité ; ce système est souvent utilisé dans des activités industrielles telles que le traitement et la transmission des céréales, du ciment, du sable ou plus généralement dans les industries alimentaires. La technique de base du transport par aspiration s'établit sur le principe du mélange du produit transmis avec l'air généré par la pression de vide dans le conduit de transport, et qui permet aux granules du produit d'être conduits dans une orientation spécifique souhaitée.

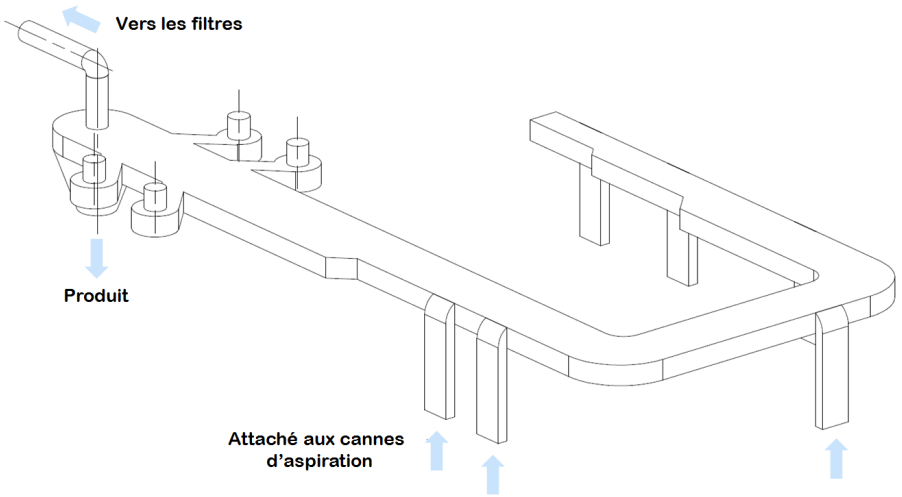


Figure 4.1 – *Schéma simplifié du système de convoyeur pneumatique*

Le système est composé de quatre ventilateurs actionnés chacun par un moteur. Cet ensemble génère, dans les conduits, un flux d'air suffisant

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

pour le transport de granules. Les granules sont aspirées au niveau des cannes d'aspiration du produit, suivent les conduits et arrivent à l'unité de séparation. Dans celle-ci, la séparation s'effectue grâce à un cyclone. Par un phénomène de centrifuge, il permet de séparer les granules qui, par gravité, vont être évacuées au bas du cyclone vers le collecteur du produit, tandis que l'air et les petites particules vont s'échapper par le sommet du cyclone vers un collecteur des poussières (filtre).

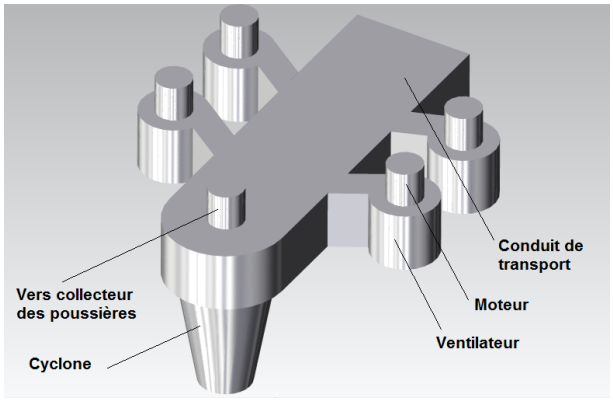


FIGURE 4.2 – *L'unité d'aspiration du système de convoyeur*

Ce système pris en exemple autorise une redondance r/n ; $(r, n \in \mathbb{N};\ \ 1 \leqslant r < n)$ avec $n = 4$ et $r = 3$. Ainsi le système est capable de fonctionner malgré la défaillance d'un de ses composants ; mais il ne peut plus assurer correctement sa mission lorsqu'au moins deux composants tombent en panne. Les 4 moteurs sont considérés comme non-réparables, durant une mission, pendant laquelle le service d'aspiration et de séparation ne peut être interrompu. Le taux des défaillances des moteurs $\lambda_i(t)$ croit linéairement avec le temps avec un facteur $P = 1 \times 10^{-7}$ selon la figure ci-après (Fig. 4.3). On considère ainsi que leur taux de défaillance et leur fiabilité ne dépendent que de leur âge $\lambda_i(t) = f(Age(c_i))$ ou $R = f(Age(c_i))$.

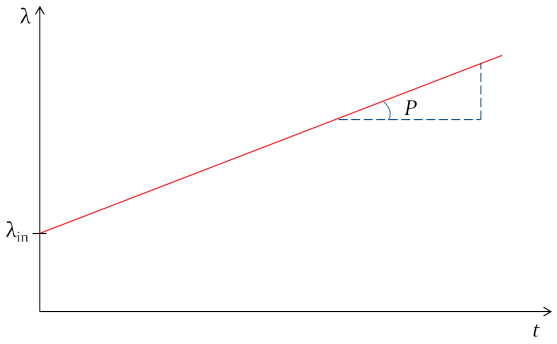


FIGURE 4.3 – *Variation des taux des défaillances*

Pour un tel système, l'ordre des défaillances des composants est sans effet ; la défaillance du système ne survient que si au moins deux compo-

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

sants tombent en panne. Les figures (Fig. 4.2) et (Fig. 4.4) présentent ce système pris comme exemple.

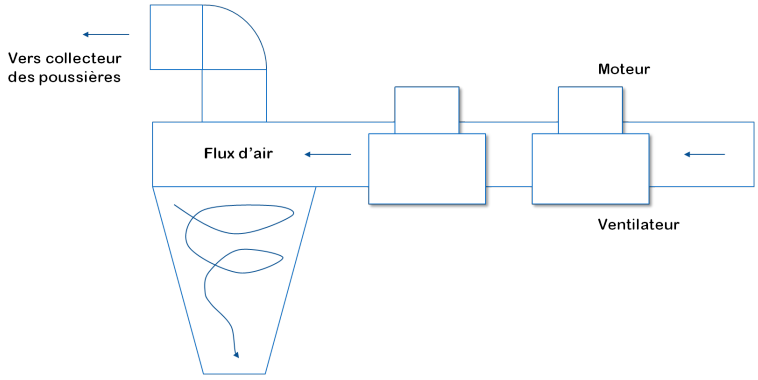


FIGURE 4.4 – *Structure du système*

Le système r/n, ici présent, possède de nombreuses caractéristiques illustrant l'intérêt de la méthode proposée, et surtout sans complexité excessive. D'un point vue structurel, il a une structure symétrique et intermédiaire entre un système série et un système parallèle. Par ailleurs, il y a une certaine indépendance entre les composants où le dysfonctionnement de l'un d'eux n'a pas d'effet sur les autres.

Après cette présentation générale du système, la section suivante s'intéresse à l'évaluation de ses paramètres de sûreté de fonctionnement.

4.1.2 Évaluer la fiabilité

L'application de la méthode présentée dans cette thèse débute par la modélisation du comportement dysfonctionnel du système. Ici, pour le système 3/4, une modélisation avec une représentation graphique peut être utilisée. Ce système est ainsi représenté à la figure ci-après (Fig. 4.5) par un diagramme de fiabilité et par un arbre de défaillance. Ils décrivent que la défaillance du système survient si au moins deux composants sont tombés en panne. Ces deux représentations définissent le comportement dysfonctionnel du système.

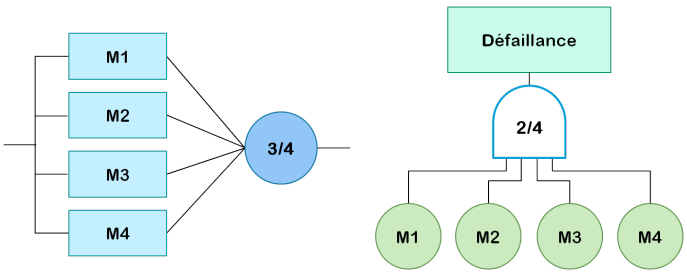


FIGURE 4.5 – *Représentation de la défaillance du système*

Comme précisé précédemment (2.2.3), la méthode d'optimisation proposée est applicable quelle que soit la loi de fiabilité utilisée pour modé-

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

liser la défaillance des composants. Il n'y a pas de restriction par rapport aux lois statistiques de défaillance. Ainsi, dans cet exemple, plutôt que de se restreindre à une loi exponentielle, une loi quelconque a été utilisée comme loi de fiabilité des composants. Plus précisément, elle s'appuie sur la connaissance de l'évolution du taux de défaillance $\lambda(t)$ et cette fiabilité est donc évaluée par l'expression suivante :

$$R(t) = exp(-\int_0^{\tau} \lambda(t)dt) \tag{4.1}$$

Le système r/n fonctionne correctement lorsqu'au moins r composants fonctionnent correctement sur n. Les composants du système fonctionnent, ou tombent en panne, mais sous l'hypothèse d'indépendance les uns des autres. Ainsi, la fonction de fiabilité individuelle de chacun des composants est $R_i(t)$ et ne dépend que de l'âge du composant et non de l'état du système ou des autres composants. La fiabilité du système est alors obtenue par l'équation suivante, en considérant des composants identiques :

$$R_{sys}(t) = \sum_{i=r}^{n} \begin{bmatrix} n \\ i \end{bmatrix} . [R(t)]^i . [1 - R(t)]^{n-i} \tag{4.2}$$

A noter que si les composants du système ne sont pas identiques, la fiabilité du système est obtenue de la somme des probabilités des différentes combinaisons de composants en panne ou en bon état pour lesquelles le système est en état d'accomplir sa fonction. Plus précisément, pour le système 3/4, la fiabilité du système est alors :

$$\begin{aligned} R_{sys} = \quad & R_1.R_2.R_3.R_4 \\ & +F_1.R_2.R_3.R_4 + R_1.F_2.R_3.R_4 \\ & +R_1.R_2.F_3.R_4 + R_1.R_2.R_3.F_4 \end{aligned} \tag{4.3}$$

4.1.3 Définir la mission du système

A la mise en service du système (c'est-à-dire au début de la mission, à $t = 0$), les composants sont supposés être neufs et donc avec comme âge, $Age(c_i) = 0$. Le système doit accomplir sa mission pendant une durée de temps d entre t et $t + d$ avec un risque de défaillance donné (pratiquement, avec un niveau fixé de risque, représenté par une valeur référence de fiabilité). Le système possédant une redondance 3/4, est considéré comme ayant accompli sa mission de durée d si au moins 3 composants sur 4 (3/4) sont toujours en bon état à la fin de la mission (alors qu'au début de la mission, le système était en état d'accomplir cette mission). Ceci définit la mission que doit assurer le système.

Dans ce contexte, l'évaluation de la fiabilité s'effectuera en se basant sur le principe de fiabilité conditionnelle (Imam, Conrard, & Bayart, 2012).

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

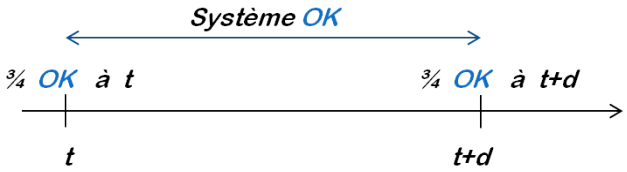


FIGURE 4.6 – *Validité du système pour une mission d*

La fiabilité du système pour assurer sa mission entre t et $t+d$ est alors obtenue par la relation suivante :

$$R(\text{Mission}) = \frac{Pr(\text{Système OK à } (t+d) \cap \text{Système OK à } t)}{Pr(\text{Système OK à } t)} \tag{4.4}$$

Dans notre contexte d'inspections périodiques, le système est destiné à être contrôlé à des intervalles de temps $t, t+d_1, t+d_2, ...$ et il doit effectuer chaque mission avec le niveau requis de sûreté de fonctionnement. Le but de l'inspection est de déterminer à chaque fois si le système nécessite une intervention pour la maintenance et si c'est le cas, sur lesquels des composants une opération doit être menée. Bien évidemment, parmi les opérations possibles, une sélection doit être faite de sorte à minimiser le coût global de maintenance au cours du cycle de vie, tout en assurant la performance souhaitée. Après chaque intervention, le système est considéré comme capable de fonctionner jusqu'à la fin de la mission avec un niveau de risque fixé.

4.1.4 La démarche

La démarche de démonstration de la méthode sera organisée de la manière suivante (Imam, Conrard, & Bayart, 2013) :

- Présentation de l'algorithme développé pour objectif de déterminer inconditionnellement les opérations de maintenance ; dans cette étape nous traitons deux configurations de maintenance suivant l'instant ou la période d'exécution.
- Amélioration de la maintenance proposée par une modification structurelle en ce qui concerne l'architecture du système étudié ; l'amélioration est réalisée grâce à l'augmentation des ressources d'informations acquises afin d'estimer l'état du système.
- Détermination de l'architecture optimale du système par une extrapolation en assimilant un fonctionnement du système pendant une période de temps assez étendue.

Au moment de l'intervention, la fiabilité du système jusqu'à la fin de la mission $R_{sys}(t+d)$ est évaluée selon la structure du système décrite par son modèle, et correspond à la fiabilité de la mission $R(Mission)$. La

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

contrainte concernant la sélection des opérations à mener, est que le système doit garder un niveau de fiabilité supérieur à la valeur requise R_{sp}, et assurer le service jusqu'à la date voulue avec ce risque fixé. La fiabilité évaluée du système au moment de l'intervention est comparée à la valeur référence R_{sp}, et détermine si des actions sont à effectuer. Dans ce cas, la détermination de la liste des actions est effectuée en appliquant la même comparaison.
Si la fiabilité du système pendant l'intégralité de la mission est supérieure à la fiabilité requise $R(Mission) > R_{sp}$, le système est considéré en bon état, et il est capable de fonctionner avec le niveau requis de sûreté jusqu'à la fin de la mission. En revanche, si la fiabilité $R(Mission) < R_{sp}$, le système, à ce moment, nécessite de maintenir sa performance en subissant une intervention de maintenance. Dans cette situation, la méthode d'optimisation propose de rechercher les actions de maintenance à effectuer avant le démarrage d'une nouvelle mission. Le choix de ces actions doit être optimal et donc à côté de la contrainte de fiabilité, un critère de minimisation du coût des actions de maintenance est également utilisé.

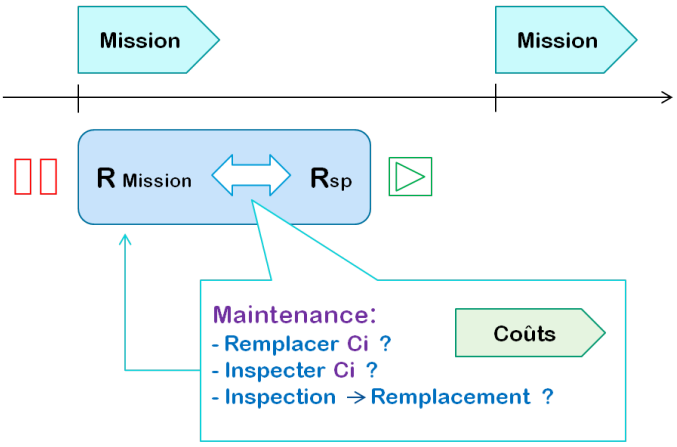


FIGURE 4.7 – *Les démarches*

Les actions possibles et considérées sont pour cet exemple :

Le remplacement : Dans ce cas, un composant est immédiatement remplacé par un autre. Vis-à-vis du système, son état est alors un retour à l'état d'un composant neuf, avec un âge à nouveau à zéro. Le taux de défaillance du composant reprend sa valeur initiale, généralement inférieure à celle du composant remplacé, c'est-à-dire $\lambda < \lambda_{remp}$, où λ_{remp} est le taux des défaillances du composant avant son remplacement. Le composant remplacé contribue à augmenter la fiabilité du système. Plus particulièrement, dans notre exemple, la méthode peut déterminer, dans la liste de maintenance, le remplacement de certains composants non encore défaillants mais dont l'âge avancé représente un risque trop important pour le système.

L'inspection : Lorsque c'est possible, et si tests sont faisables, l'inspection

© 2015 Tous droits réservés.
doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

"simple" de composants peut fournir des indicateurs et des informations nécessaires pour évaluer l'état du système et aider à déterminer l'exécution d'autres actions par ce contrôle approprié. Après l'inspection, le rapport de l'état fourni permet d'établir les recommandations qui concernent la suite du processus de maintenance. L'inspection peut être visuelle, vérification de certains paramètres ou parties ou vérification des liens et du contact entre les sous-systèmes ou les composants.

Un remplacement conditionné : Cela consiste en une inspection suivie par du remplacement conditionnel du composant considéré, c'est-à-dire, si c'est nécessaire et selon le besoin. Cette action est, en fait, l'association des deux précédentes actions de maintenance.

L'ensemble de toutes les actions possibles de maintenance dans notre exemple est $\{A\}$, mais c'est pratique de noter que les composants sont identiques, donc l'ensemble des actions possibles à appliquer sur chaque composant i est le même $\{a_i\}$ pour tous les composants ; et dans cet exemple $\{A\} = \{a_i\}$, $i \in \{1,2,3,4\}$. Pour chaque a_i, j actions sont possibles, où $j \in \{1,2,3\}$:

$$\mathrm{a}_i^j = \begin{cases} a_i^1 & ins & \text{Inspection (Test)} \\ a_i^2 & remp & \text{Remplacement} \\ a_i^3 & rempC & \text{Remplacement conditionné} \end{cases}$$

L'application de chaque action j sur un composant i provoque un certain coût $C_i^j > 0$, $j \in \{1,2,3\}$:

$$\mathrm{C}_i^j = \begin{cases} C_i^1 & C_i^{ins} & \text{Coûts d'inspection sur } c_i \\ C_i^2 & C_i^{remp} & \text{Coûts de remplacement sur } c_i \\ C_i^3 & C_i^{rempC} & \text{Coûts de remplacement conditionné sur } c_i \end{cases}$$

Dans l'exemple proposé, les paramètres choisis sont listés ci-dessous. Le taux de défaillance λ augmente linéairement avec le temps avec une pente de 1×10^{-7} et suit la fonction mentionnée précédemment, voir la figure (Fig. 4.8). Un tableau (tab 4.1) peut être établi suivant les étapes de l'algorithme A. Dans ce tableau, on présente les résultats dans lesquels on a, à chaque intervention, la fiabilité du système et la décision qui concerne les choix possibles de maintenance (si nécessaire). La méthode indique les composants pour lesquels une action de maintenance doit être menée, dans le tableau, on appelle M_i, le composant i. Comme précisé précédemment, les composants qui doivent être remplacés peuvent être soit défaillants, soit en bon fonctionnement mais alors trop âgés. Ainsi on considère les paramètres suivants, pour ce système en redondance 3/4.

$$\begin{array}{lll} \text{System est OK} \Leftrightarrow & 3/4 & c_i \text{ OK à } t \\ & 3/4 & c_i \text{ OK à } t+d \quad ; i \in \{1,2,3,4\} \end{array}$$

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

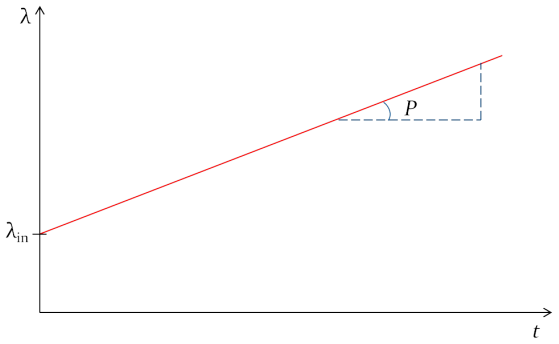


FIGURE 4.8 – *Variation des taux des défaillances*

Loi de fiabilité	$R(t) = exp(-\int_0^t \lambda(x)dx)$	Exponentielle
Seuil de fiabilité	$R_{sp} = 0.9900$	
Taux initial des défaillances	$\lambda_{in} = 5 \times 10^{-5}$	
Pente	$P = 1 \times 10^{-7}$	
Taux des défaillances	$\lambda = \lambda_{in} + \hat{\text{A}}\text{ge} * P$	
Durée de mission	$d = 100$	unité de temps
Coûts d'inspection	$C_i^{ins} = 20$	unités
Coûts de remplacement	$C_i^{remp} = 100$	unités

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

TABLE 4.1 – *Déroulement des opérations de maintenance du système exemple et pour une mission d périodique*

Temps	*R(Mission)* Avant Op.	Intervention	*R(Mission)* Après Op.
0	0.99982	Pas d'action	
100	0.99933	Pas d'action	
200	0.99865	Pas d'action	
300	0.99776	Pas d'action	
400	0.99665	Pas d'action	
500	0.99532	Pas d'action	
600	0.99378	Pas d'action	
700	0.99202	Pas d'action	
800	0.99005	Pas d'action	
900	0.98790	Remplacement : M4	0.99216
1000	0.99026	Pas d'action	
1100	0.98817	Remplacement : M1	0.99339
1200	0.99164	Pas d'action	
1300	0.98969	Remplacement : M3	0.99547
1400	0.99397	Pas d'action	
1500	0.99226	Pas d'action	
1600	0.99035	Pas d'action	
1700	0.98825	Remplacement : M2	0.99587
1800	0.99443	Pas d'action	
1900	0.99278	Pas d'action	
2000	0.99092	Pas d'action	
2100	0.98886	Remplacement : M4	0.99433
2200	0.99268	Pas d'action	
2300	0.99083	Pas d'action	
2400	0.98878	Remplacement : M1	0.99471
2500	0.99311	Pas d'action	
2600	0.99131	Pas d'action	
2700	0.98930	Remplacement : M3	0.99548
2800	0.99399	Pas d'action	
2900	0.99228	Pas d'action	
3000	0.99038	Pas d'action	
3100.0	0.98828	Remplacement : M2	0.99474
3200.0	0.99314	Pas d'action	
3300.0	0.99133	Pas d'action	
3400.0	0.98933	Remplacement : M4	0.99511
3500.0	0.99356	Pas d'action	
3600.0	0.99180	Pas d'action	
3700.0	0.98985	Remplacement : M1	0.99548
3800.0	0.99399	Pas d'action	
3900.0	0.99228	Pas d'action	
4000.0	0.99038	Pas d'action	
4100.0	0.98828	Remplacement : M3	0.99474
4200.0	0.99314	Pas d'action	
4300.0	0.99133	Pas d'action	
4400.0	0.98933	Remplacement : M2	0.99511
4500.0	0.99356	Pas d'action	

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

L'algorithme propose les remplacements non-périodiques successifs de ($M4, M1, M3, M2$). Le tableau suivant reprend les instants de remplacement, et dans lequel on peut remarquer que les opérations de maintenance ne sont pas périodiques pour M4 et M2, et périodiques pour M1 et M3.

$M4$	$M1$	$M3$	$M2$
900	1100	1300	1700
2100	2400	2700	3100
3400	3700	4100	4400

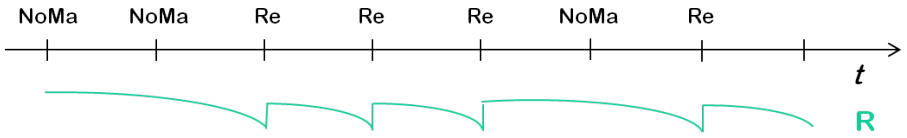


FIGURE 4.9 – *Application de la méthode d'une manière périodique - NoMa signifie no maintenance et Re pour indiquer au remplacement*

Dans la réalité de fonctionnement des systèmes, les reprises de maintenance préventive ne sont quasiment jamais périodiques ; les périodes de maintenance dépendent de la production à effectuer, du temps de fonctionnement des systèmes, des conditions de fonctionnement et surtout dépendent de l'état global des composants qui ont plus de chance d'être en mauvais état en fin de leur cycle de vie.

La méthode reste valable et pratique même lorsque la planification des missions de maintenance adopte des intervalles non-périodiques. A l'aide de la méthode, on peut toujours fournir, d'une manière optimale, une liste des actions de maintenance qui permettent, lorsqu'elles seront prises en compte pendant la maintenance, de donner au système la capacité d'arriver à la fin de sa mission en bon état de fonctionnement, ou avec le niveau de risque fixé, en réalisant une minimisation des coûts de maintenance sur l'ensemble de la durée de vie du système (Fig. 4.10).

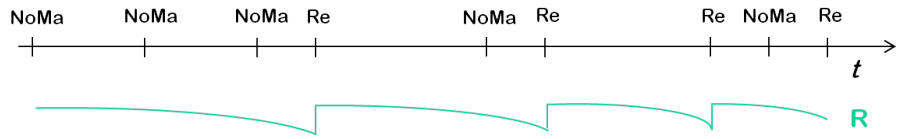


FIGURE 4.10 – *Application de la méthode d'une manière non-périodique*

Le tableau 4.2 présente l'application de la méthode sur le système de convoyeur prenant en considération des missions de maintenance non-périodiques, planifiées d'une manière différente du premier cas selon le vrai besoin du niveau de fiabilité et de maintenance. On remarque toujours que les actions proposées dépendent de la durée de mission qui suit l'intervention de maintenance, et selon l'état du système, les actions qui minimisent les coûts de maintenance sont déterminées. De même, on

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

TABLE 4.2 – *Déroulement des opérations de maintenance du système exemple pour une mission d non-périodique*

Temps	*R(Mission)* Avant Op.	Intervention	*R(Mission)* Après Op.
0	0.9999	Pas d'action	
100	0.9998	Pas d'action	
200	0.9994	Pas d'action	
300	0.9990	Pas d'action	
400	0.9985	Pas d'action	
500	0.9916	Pas d'action	
800	0.9957	Pas d'action	
900	0.9861	Remplacement : M1	0.9908
1150	0.9921	Pas d'action	
1300	0.9937	Pas d'action	
1400	0.9929	Pas d'action	
1500	0.9835	Remplacement : M2	0.9961
		Remplacement : M3	
1700	0.9930	Pas d'action	
1900	0.9952	Pas d'action	
2000	0.9944	Pas d'action	
2100	0.9785	Remplacement : M4	0.9982
		Remplacement : M1	
		Remplacement : M2	
2400	0.9930	Pas d'action	
2700	0.9962	Pas d'action	
2800	0.9954	Pas d'action	
2900	0.9917	Pas d'action	
3050	0.9899	Remplacement : M3	0.9946
3200	0.9954	Pas d'action	
3300	0.9946	Pas d'action	
3400	0.9938	Pas d'action	
3500	0.9853	Remplacement : M4	0.9969
		Remplacement : M1	
3700	0.9939	Pas d'action	
3900	0.9906	Pas d'action	
4100	0.9874	Remplacement : M2	0.9979
		Remplacement : M3	
4300	0.9938	Pas d'action	
4550	0.9892	Remplacement : M4	0.9943
4800	0.9964	Pas d'action	
4900	0.9956	Pas d'action	
5000	0.9948	Pas d'action	
5100	0.9837	Remplacement : M1	0.9961
		Remplacement : M2	
5350	0.9917	Pas d'action	
5600	0.9868	Remplacement : M3	0.9938
5850	0.9940	Pas d'action	
6000	0.9829	Remplacement : M4	0.9912

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

s'attend au remplacement de plusieurs composants avant une mission de longue durée pour que le système puisse réaliser sa mission avec succès. Les paramètres suivants sont considérés dans les calculs. Dans le tableau, nous avons ajouté une colonne indiquant la fiabilité après avoir appliqué les actions proposées afin de mettre en valeur l'effet induit par les actions de maintenance.

Loi de fiabilité	$R(t) = exp(-\int_0^t \lambda(x)dx)$	Exponentielle
Seuil de fiabilité	$R_{sp} = 0.9900$	
Taux initial des défaillances	$\lambda_{in} = 5 \times 10^{-5}$	
Pente	$P = 1 \times 10^{-7}$	
Taux des défaillances	$\lambda = 1 \times 10^{-4}$	
Durée de mission	$d_k =$ non périodique	
Coûts d'inspection	$C_{ins} = 20$	unités
Coûts de remplacement	$C_{remp} = 100$	unités

Dans cet exemple, on peut voir qu'à certains instants, une seule intervention de maintenance ne suffit pas et qu'il faut remplacer plusieurs composants. On peut noter également que les remplacements sont toujours effectués dans le même ordre. Mais il est nécessaire d'effectuer le calcul sur tous les composants.

L'algorithme de détermination des actions de maintenance peut être utilisé dans le cas d'une maintenance périodique ou non-périodique. A chaque instant prévu, l'algorithme détermine s'il faut faire, ou non, une action de maintenance, et quelle action faire.

Adaptation à l'historique de la maintenance

On avait mentionné précédemment qu'une action optimale doit être capable de prendre en considération certaines caractéristiques qui concernent les critères sélectionnés. Une défaillance du système peut être générée au moment $t < t_f < t + d$ pendant la mission, ce fait nécessite une intervention corrective immédiate "non-planifiée". Pendant cette action de maintenance, certains composants peuvent être remplacés ou inspectés ce qui change l'ordre des actions de maintenance déjà proposées dans la liste. Il est fortement possible que ces actions soient improductives dans la liste après la modification corrective effectuée ; une mise à jour de la liste des actions proposées, capable de s'adapter au changement causé par l'action corrective non-planifiée permet finalement de fournir la solution optimale.

Dans les deux tableaux 4.1 et 4.2, on a fourni les actions de maintenance préventive qui peuvent être appliquées lors d'une intervention périodique pour la maintenance ; pendant ces périodes, il est possible d'avoir une défaillance pendant la mission d, et donc une action corrective sera proposée. La simulation dans le tableau ci-après 4.3 permet d'illustrer cette caractéristique de la méthode. Les paramètres suivants sont utilisés :

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Loi de fiabilité	$R(t) = exp(-\int_0^t \lambda(x)dx)$	Exponentielle
Seuil de fiabilité	$R_{sp} = 0.9900$	
Taux initial des défaillances	$\lambda_{in} = 1 \times 10^{-5}$	
Pente	$P = 1 \times 10^{-7}$	
Taux des défaillances	$\lambda = \lambda_{in} + \hat{\text{A}}\text{ge} * P$	
Durée de mission	$d = 100$	unité de temps
Coûts d'inspection	$C_{ins} = 20$	unités
Coûts de remplacement	$C_{remp} = 100$	unités

On observe qu'après une défaillance inattendue, suivie par une action corrective, la reprise des opérations de maintenance va prendre en considération les changements effectués dans l'historique de maintenance (Fig. 4.11).

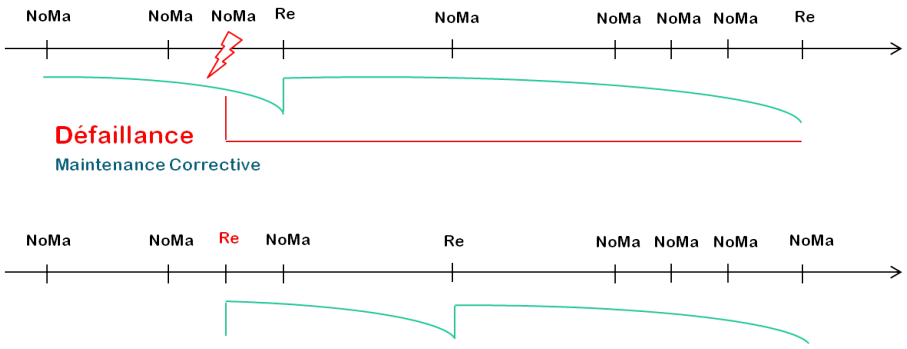


FIGURE 4.11 – *Adaptation de la méthode à l'historique de la maintenance*

L'algorithme peut donc être utilisé soit de manière provisionnelle pour déterminer les futures actions de maintenance du système, si on connait les missions que le système doit effectuer ; soit au cours de temps, et pour chaque mission, en tenant en compte les actions de maintenance corrective effectuées.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

TABLE 4.3 – *La prise en compte des actions correctives pendant les opérations de maintenance du système exemple pour une mission d périodique*

Temps	*R(Mission)*		Intervention	Après changement	
100	0.99998		Pas d'action		
200	0.99982		-		
300	0.99380		-		
400	0.99665		-		
500	0.99432		-		
600	0.99128		-		
700	0.98754		Remp. 1		0.99295
			Remp. 2		0.99708
800	0.99506		-		
900	0.99236		-		
1000	0.98898		Remp. 3		0.99646
1100	0.99407		-		
1200	0.99101		-		
1300	0.98728		Remp. 4		0.99680
1400	0.99463		-		
1500	0.99177		-		
1600	0.98822	0.98822	Remp. 1	Failure	0.99822
				Remp. 3	
				Remp. 2	
1700	0.99240	0.99649	-	Pas d'action	0.99649
1800	0.98903	0.99410	Remp. 2	-	0.99410
1900	0.99462	0.99103	-	-	0.99103
2000	0.99174	0.98730	-	Remp. 1	0.99683
2100	0.98819	0.99466	Remp. 3	-	0.99466
2200	0.99395	0.99179	-	-	0.99179
2300	0.99091	0.98824	-	Remp. 4	0.99568
2400	0.98720	0.99316	Remp. 4	-	0.99316
2500	0.99318	0.98996	-	Remp. 3	0.99631
2600	0.98997	0.99394	Remp. 1	-	0.99394
2700	0.99462	0.99089	-	Remp. 2	0.99773
2800	0.99174	0.99589	-	-	0.99589
2900	0.98819	0.99336	Remp. 2	Pas d'action	0.99336
3000	0.99395	0.99015	-	-	0.99015
3100	0.99091	0.98627	-	Remp. 1	0.99510
3200	0.98720	0.99241	Remp. 3	-	0.99241
3300	0.99318	0.98904	-	Remp. 4	0.99624
3400	0.98997	0.99389	Remp. 4	-	0.99389
3500	0.99462	0.99084	-	-	0.99084
3600	0.98819	0.98714	-	Remp. 3	0.99576
3700	0.98997	0.99322	Remp. 1	-	0.99322
3800	0.99395	0.99001	-	-	0.99001

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Simulation de Monte-Carlo de la méthode appliquée au système du convoyeur pneumatique

Une simulation de type Monte-Carlo permet d'avoir une idée qui englobe la vie d'un système à long terme ; ces méthodes sont souvent utilisées lorsqu'un grand nombre de données est traité, ce qui peut compliquer les processus du développement mathématique. La méthode de simulation de Monte-Carlo est une méthode numérique basée sur la circulation aléatoire de numéros, elle permet d'estimer l'espérance des variables aléatoires, qui est une fonction de plusieurs paramètres (qui peuvent être eux-mêmes des variables aléatoires aussi) ; cette estimation peut être obtenue en prenant la moyenne des résultats d'un grand nombre d'histoires qui représentent le comportement dynamique du problème étudié. L'utilisation de Monte-Carlo dans le domaine de la sûreté de fonctionnement permet de traiter des systèmes complexes. L'étude de fiabilité des systèmes dépend du calcul ou de l'estimation des probabilités des événements redoutés qui représentent les défaillances des systèmes ; plus ces événements sont rares, plus le nombre des histoires simulées doit être grand pour avoir des résultats "véridiques".

Le tableau ci-après (tab. 4.4) présente la simulation de la méthode, appliquée sur le système du convoyeur, pour une période assez étendue, on fournit simplement la date où il est possible d'avoir un état de panne d'un des composants en précisant lequel. Lorsqu'on arrive à deux composants en panne, le système 3/4 sera considéré en défaillance, et cela sera indiqué dans le tableau de simulation par l'état de panne de système. On constate dans le tableau aussi qu'à certain moment il ne sera plus suffisant de remplacer un seul composant (puisque le niveau requis de fiabilité n'est pas atteint avec le remplacement d'un seul composant) il y a besoin d'un deuxième remplacement pour pouvoir maintenir le niveau de performance souhaité et résister jusqu'à la fin la mission ; et cela peut s'afficher en panne deux fois répétitives dans le tableau. Les paramètres suivants ont été utilisés.

Loi de fiabilité	$R(t) = exp(-\int_0^t \lambda(x)dx)$	Exponentielle
Seuil de fiabilité	$R_{sp} = 0.9900$	
Taux initial des défaillances	$\lambda_{in} = 5 \times 10^{-5}$	
Pente	$P = 1 \times 10^{-7}$	
Taux des défaillances	$\lambda = \lambda_{in} + \hat{\text{A}}\text{ge} * P$	
Durée de mission	$d = 100$	unité de temps
Coûts d'inspection	$C_{ins} = 20$	unités
Coûts de remplacement	$C_{remp} = 100$	unités

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Table 4.4 – *Simulation de Monte-Carlo pour la méthode sur une période de 100000 unités de temps*

Temps	Composant en panne	*Temps*	Composant en panne
1200.0	M2	47500.0	M1
2600.0	M1	47700.0	M3
9600.0	M4	Système En Panne	
14400.0	M3	48700.0	M3
14600.0	M4	51300.0	M2
Système En Panne		52800.0	M3
16500.0	M4	55200.0	M2
18500.0	M4	56700.0	M2
21100.0	M1	57900.0	M1
26600.0	M1	60000.0	M4
27100.0	M2	67200.0	M2
27800.0	M3	69100.0	M1
28200.0	M1	69400.0	M4
29600.0	M1	Système En Panne	
29900.0	M4	71700.0	M4
31600.0	M4	74800.0	M2
32700.0	M3	77600.0	M1
Système En Panne		81500.0	M3
32800.0	M2	86300.0	M4
Système En Panne		86400.0	M1
34200.0	M2	Système En Panne	
34800.0	M3	Système En Panne	
35200.0	M2	89000.0	M2
Système En Panne		90700.0	M4
Système En Panne		92500.0	M1
35600.0	M4	92900.0	M3
Système En Panne		Système En Panne	
37500.0	M4	94500.0	M2
44300.0	M4	96600.0	M3
44600.0	M1	98700.0	M3

Amélioration de performance du système - modification de l'architecture

La conception des architectures des systèmes pour objectif de maintenance est une approche fréquemment appliquée pour améliorer la performance et la "survivabilité [1]" sur la période utile de son cycle de vie ; cette approche joue son rôle par l'influence directe ou indirecte sur les actions de maintenance qui seront prises en charge durant les périodes d'intervention. Une architecture optimisée peut aider à perfectionner les tactiques de distribution des tâches des actions proposées, et aider à améliorer la disposition voire à permettre la mise en place d'un calendrier d'intervention relativement optimal. De plus, une architecture "améliorée", permet d'accroître le niveau de sûreté du système, mais aussi, la disponibilité et la

1. Capacité à survivre, ou la capacité de maintenir le service malgré la faiblesse.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

fiabilité qui contribuent à diminuer les efforts de maintenance et à maintenir le système le plus longtemps possible dans des bonnes conditions de fonctionnement, ceci conduit à éviter les dépenses supplémentaires consacrées à la maintenance.

L'objectif principal de cette section est de sélectionner la structure de conception optimale du système du convoyeur à l'aide de la décision prise pour la maintenance dans l'étape précédente ; il s'agit d'évaluer la contribution d'un sous-système de diagnostic intégré au système, dans l'amélioration de la capacité du système à fournir son service pendant une mission sans que cette amélioration ne coûte cher ; la meilleure structure du système est celle qui apporte la meilleure contribution au niveau du rapport (coûts de maintenance - fiabilité du système). Comme principe, le diagnostic du système comporte la détection et l'isolement des défauts qui empêchent le système de fournir certains services ; l'idée de base de la détection est de vérifier que les comportements observés du système sont dissemblables ou pas aux comportements attendus dans les spécifications ; et l'idée de base de l'isolement est de comprendre que certains comportement ne sont produits que par certains défauts et ceci conduit à déterminer quel composant est l'origine de quels défauts.

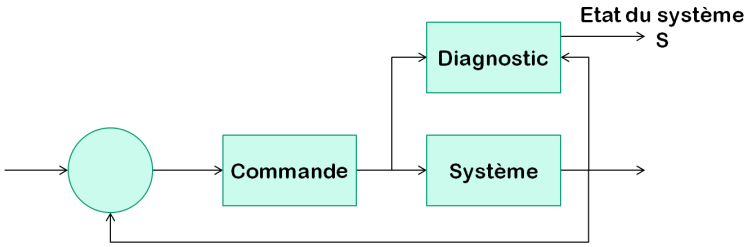


FIGURE 4.12 – *Le principe du sous-système de diagnostic*

Lors de la détection d'un défaut d'un des composants, le capteur provoque le déclenchement d'une alarme pour avertir l'échec qui pourrait être caché (effets invisibles pour l'utilisateur du système). Le système continue son fonctionnement normal jusqu'à la prochaine date d'intervention, à ce moment là, le technicien de maintenance est informé du problème et il peut directement intervenir pour corriger. Il est possible qu'un autre défaut se reproduise avant la date d'intervention de la maintenance, ceci provoque une défaillance globale du système qui exige une intervention corrective immédiate.

Dans l'exemple du convoyeur, on propose une modification de la structure du système d'une manière qui permet de diminuer la probabilité d'occurrence des événements suspicieux, et permet de détecter les défauts des composants, ceci augmente la robustesse du système. Un capteur de mesure de vitesse de l'air peut être installé dans la structure des quatre

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

moteurs, qui permet de comparer le débit d'air à une valeur de référence [2]. Une différence entre les valeurs de vitesse aidera à acquérir des informations utiles sur le défaut d'un ou de plusieurs moteurs, dans l'exemple, l'intérêt est d'être informé à l'occurrence du défaut d'un seul moteur (Système 3/4) pour éviter d'avoir une défaillance du système.

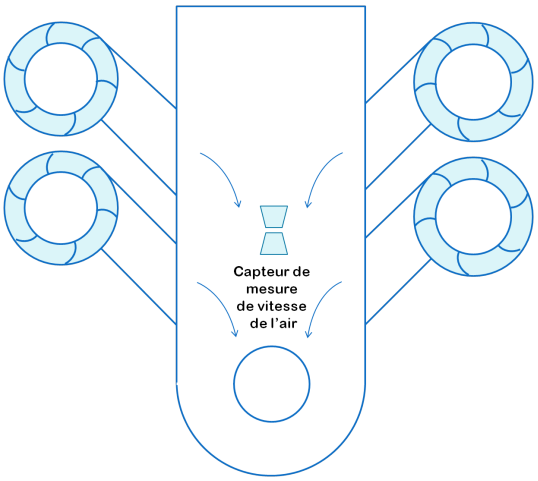


FIGURE 4.13 – *La modification de l'architecture du système*

La panne d'un des moteurs provoque une réduction de la capacité de transport du produit. Le sous-système de diagnostic, représenté par le capteur de mesure de vitesse de l'air, est présumé détecter ce changement par l'affirmation de la différence f entre le débit actuel Q et la valeur référence $\tilde{Q}$ acquise de l'observateur $\acute{M}$. Cette différence est donnée par $f = Q - \tilde{Q}$; la détection sera confirmée lorsque la différence f dépasse un seuil prédéfini par le concepteur selon les conditions de fonctionnement et la capacité des moteurs (Fig. 4.14).

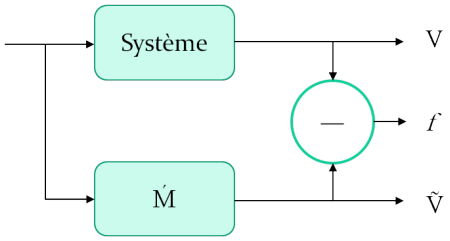


FIGURE 4.14 – *La détection d'une erreur*

Le capteur est capable de provoquer le déclenchement d'un signal d'alarme, afin d'informer les responsables de l'état du système. Dans ce cas-là, la condition de validité de la mission du système sera de rester en bon fonctionnement pendant la période $[t : t + d]$, avec la possibilité d'avoir une signal d'alarme durant la mission (vu que le système est re-

2. La valeur de référence est établie en se basant sur la capacité d'inspiration produite par les quatre ventilateurs.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

dondant et capable de fonctionner malgré la défaillance d'un des moteurs). La probabilité conditionnelle utilisée pour estimer la fiabilité sur la mission sur $[t : t + d]$ sera donc :

R(Mission)=

$$\frac{Pr(\text{Système OK à } (t+d) \cap \text{Système OK avec alarme à } t)}{Pr(\text{Système OK avec alarme à } t)} \tag{4.5}$$

Pour estimer cette fiabilité, on a utilisé une représentation graphique du système à l'aide des diagrammes de décision binaires BDD avec une réduction effectuée, le diagramme est représenté dans la figure suivante (Fig. 4.15). Le fonctionnement du système est enchaîné par les comportements suivants du diagramme :

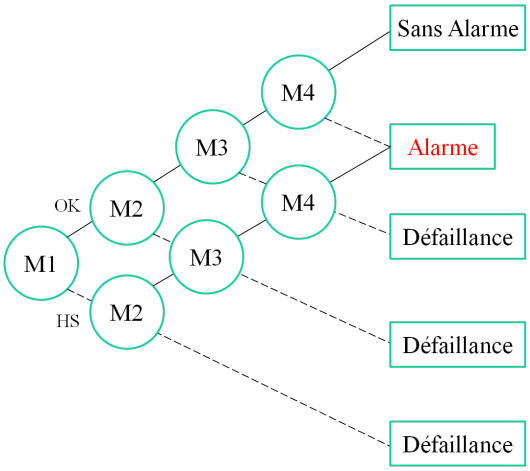


FIGURE 4.15 – *BDD du système de convoyeur*

$$\begin{aligned} D(M_1, M_2, M_3, M_4) = \quad & (M_1 \wedge M_2 \wedge M_3 \wedge M_4) \\ \vee \quad & (\neg M_1 \wedge M_2 \wedge M_3 \wedge M_4) \\ \vee \quad & (M_1 \wedge \neg M_2 \wedge M_3 \wedge M_4) \\ \vee \quad & (M_1 \wedge M_2 \wedge \neg M_3 \wedge M_4) \\ \vee \quad & (M_1 \wedge M_2 \wedge M_3 \wedge \neg M_4) \end{aligned}$$

L'application de la méthode de détermination des actions de maintenance va permettre de comparer le comportement du système modifié avec le système de base. Ceci nous donnera une idée sur l'efficacité rendue suite à l'intégration de cette nouvelle structure du système ; la sélection sera basée sur la meilleure contribution dans le processus d'optimisation de maintenance. La simulation de Monte-Carlo peut donner une idée globale sur l'intégralité de la vie utile du système. On peut comparer, à long terme, les deux comportements au niveau de nombre des défaillances possibles des systèmes pendant cette période étendue ; plus la simulation est longue, plus les résultats ressemblent à la vie réelle du système. Dans le tableau ci-dessous, une simulation de type Monte-Carlo est réalisée sur les deux systèmes (système de base et système modifié), cela permet de voir l'avancement de chacun des systèmes dans les mêmes conditions de

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

fonctionnement. Les paramètres suivants sont utilisés dans le processus de simulation :

Loi de fiabilité	$R(t) = exp(-\int_0^t \lambda(x)dx)$	Exponentielle
Seuil de fiabilité	$R_{sp} = 0.9900$	
Taux initial des défaillances	$\lambda_{in} = 5 \times 10^{-5}$	
Pente	$P = 1 \times 10^{-7}$	
Taux des défaillances	$\lambda = \lambda_{in} + \hat{\text{A}}\text{ge} * P$	
Durée de mission	$d = 100$	unité de temps
Coûts d'inspection	$C_{ins} = 20$	unités
Coûts de remplacement	$C_{remp} = 100$	unités

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

TABLE 4.5 – *Simulation de Monte-Carlo pendant une période de 150000 unités de temps appliquée sur le processus d'optimisation de maintenance du système de convoyeur*

Structure de base		Structure modifiée	
Temps	*Défaillance*	*Temps*	*Défaillance*
2100.0	M1	1800.0	M1
3700.0	M1	3200.0	M2
5200.0	M2	4000.0	M4
6700.0	M3	10100.0	M1
8300.0	M1	10100.0	M2
10900.0	M3	Défaillance du système	
15200.0	M4	10900.0	M1
21000.0	M2	11700.0	M4
21200.0	M4	12600.0	M2
22100.0	M3	14500.0	M4
Défaillance du système		14800.0	M2
23100.0	M1	16100.0	M2
28300.0	M2	16200.0	M3
30500.0	M1	16900.0	M1
33700.0	M3	16900.0	M4
33800.0	M2	Défaillance du système	
Défaillance du système		Défaillance du système	
Défaillance du système		18700.0	M1
37500.0	M3	21000.0	M1
Défaillance du système		21500.0	M1
44500.0	M1	21500.0	M3
Défaillance du système		Défaillance du système	
52700.0	M4	23000.0	M1
57300.0	M1	23000.0	M2
61200.0	M1	Défaillance du système	
Défaillance du système		25800.0	M1
Défaillance du système		30100.0	M2
63100.0	M1	30600.0	M3
...	...	...	...
...	...	...	...
...	...	...	...
...	...	...	...
132000.0	M3	131900.0	M3
Défaillance du système		132300.0	M4
Défaillance du système		132500.0	M1
Défaillance du système		135200.0	M1
132700.0	M4	136900.0	M4
Défaillance du système		137400.0	M1
137300.0	M3	138200.0	M1
142500.0	M1	144900.0	M3
143300.0	M4	145600.0	M4
149200.0	M3	147400.0	M3

Pour que le résultat de comparaison soit clair, le tableau suivant présente un résumé de la simulation qui permet de comparer entre le nombre des défaillances du système, le nombre des remplacements et des inspec-

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

tions effectués, et bien sûr les dépenses totales sur toute la période. Il est impératif de mentionner que les actions de maintenance proposées sont déjà des actions optimales, exclues dépendant du seuil de sûreté et des critères de coût. La structure optimale est facile à être sélectionnée, dans ce cas, selon la totalité des dépenses au cours des opérations de maintenance possibles pendant la vie du système ; on trouve clairement l'apport significatif porté par le sous-système de diagnostic ajouté au système de convoyeur ; un apport de quasiment plus de la moitié des coûts attribués au système pour la maintenance.

	Initiale	Modifiée
Temps de simulation	150000	
Remplacement	450	196
Inspection et remplacement	0	16
Inspection sans remplacement	0	22
Défaillances	12	6
Coûts totaux	47400	21560

Dans cette partie, on a proposé d'améliorer l'architecture du système en lui ajoutant un système de diagnostic. La comparaison qui vient d'être effectuée ne prenait pas en compte les défaillances possibles de ce sous-système ; la section ci-après va considérer les modes des défaillances qui peuvent affecter le processus d'optimisation en ce qui concerne la fiabilité du système ou les coûts de maintenance supplémentaires dûs aux remplacements, ou à l'arrêt causé par le processus de maintenance lors de l'inspection.

La prise en compte des défaillances de sous-système de diagnostic lors de l'application de la méthode

On va représenter dans cette section la même structure du système modifié (système de convoyeur avec un sous-système de mesure du débit d'air), mais en considérant deux modes des défaillances possibles du système de diagnostic. Juste pour donner une idée de l'importance de la prise en compte des défauts des capteurs, je voudrais citer quelques accidents impliquant des capteurs dans différents secteurs industriels qui dépendent principalement de systèmes automatisés.

En juin 1997, selon la base de données de retour d'expériences sur les accidents technologiques, dans un abattoir, une fuite toxique non détectée de 2,2 tonnes d'ammoniac (NH_3), dans un des circuits des congélateurs à steaks hachés, a causé l'arrêt de l'ensemble des processus pendant 30 heures pour pouvoir ventiler les locaux, sans parler des dommages matériels et la perte d'exploitation. En juillet 2003, lors d'une opération de maintenance effectuée dans une raffinerie, et suite à un détecteur en défaut, un flux d'eau polluée par un hydrocarbure fluide a été déversé dans

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

les milieux naturels sans que le détecteur ne le signale et la fuite n'a été découverte que trois jours plus tard. En 2011, suite à un capteur du procédé en panne, 25 m^3 d'essence se sont écoulés dans un processus de transfert dans un dépôt pétrolier à cause d'un débordement non détecté du bac récepteur, et qui par la suite a causé la présence de vapeurs d'hydrocarbures lors du déversement dans l'égout du local [ARIA]. Et selon l'ARIA aussi, le nombre annuel d'accidents impliquant des capteurs dans les secteurs industriel automatisés est important tel que la figure ci-dessous le montre.

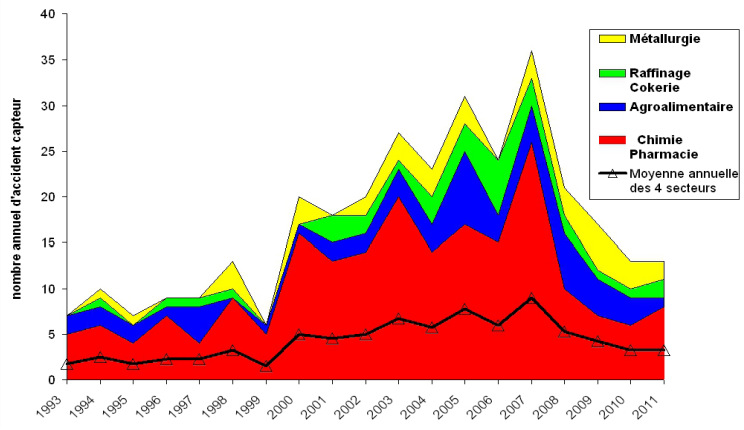


FIGURE 4.16 – *Le nombre annuel d'accidents impliquant des capteurs dans les secteurs industriel automatisés par secteur d'activité entre 1992 et 2011 [ARIA]*

Les chiffres et les accidents évoqués précédemment sont présentés juste pour donner une idée sur l'importance de la prise en compte des défauts de ces sous-systèmes. D'ailleurs dans notre architecture modifiée du système, un capteur de mesure de vitesse de l'air est installé dans la structure du système de convoyeur, selon les paramètres caractéristiques de celui-ci, il peut avoir :

- Un mode de fonctionnement normal.

- Un mode de fonctionnement dégradé. Dans ce dernier, deux possibilités sont présentes (Fig. 4.18)) :

  - Le capteur peut fournir une mesure nulle malgré une grandeur physique (débit d'air) non nulle, et cela est indiqué (Non-détection ou Sans Alarme) dans l'exemple.

  - Ou bien il peut fournir une mesure fausse (d'une valeur supérieure au seuil de fonctionnement normal avec quatre moteurs (Fig. 4.17)), il s'agit d'une mesure qui ne correspond pas à la vraie valeur de la grandeur mesurée (Fausse Alarme).

Considérant que M représente le fonctionnement sans avoir aucun moteur défaillant, et $\overline{M}$ le cas d'avoir un moteur en état de panne, la sortie de mesure Q peut être :

- $Q > S \wedge M$ Mode de fonctionnement normal sans détection d'alarme.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

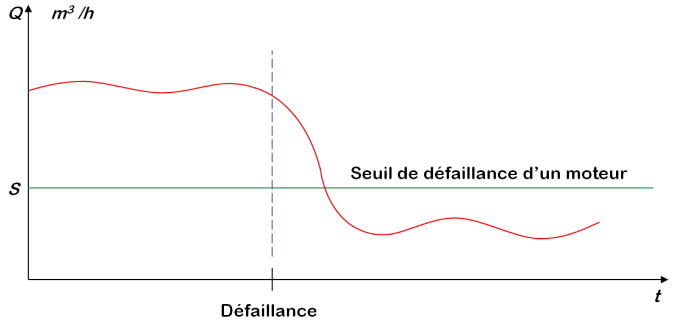


FIGURE 4.17 – *Seuil de décision du capteur pour déclencher l'alarme*

- $Q < S \wedge \overline{M}$ Mode de fonctionnement normal avec une détection d'alarme.

- $Q > S \forall (M \vee \overline{M})$ Mode fonctionnement dégradé sans alarme.

- $Q < S \forall (M \vee \overline{M})$ Mode fonctionnement dégradé fausse alarme.

Dans cet exemple, on va considérer que, dans le mode dégradé, il y a 75% de chance que le capteur passe par le mode de dysfonctionnement Fausse Alarme $\delta_{FA} = 0.75$, et 25% de chance qu'il passe par le mode de dysfonctionnement Sans Alarme $\delta_{SA} = 0.25$.

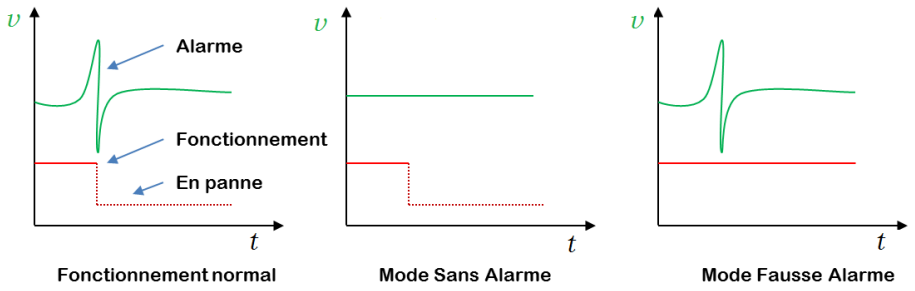


FIGURE 4.18 – *Deux modes de dysfonctionnement du capteur*

La fiabilité du capteur suit une loi quelconque établit par la connaissance de l'évolution des taux des défaillances $\lambda_{cap}(t)$, l'expression de sa fiabilité est donc donnée par :

$$R_{cap} = exp[-\int \lambda_{cap}(t)dt] \tag{4.6}$$

Pour estimer la fiabilité du système sur l'ensemble de la mission, on représente le système du convoyeur dans un nouveau modèle établi par un arbre de décision, cette nouvelle représentation permettra de prendre en considération les deux modes de dysfonctionnement du capteur ; en considérant les probabilités de dysfonctionnement décrites ci-dessus, cela donne les expressions suivantes ; je re-précise que les probabilités des modes de dysfonctionnement δ_{FA} et δ_{SA} sont déterminées par le concepteur :

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

$$R_{cap}^{FA} = \delta_{FA}.(1 - R_{cap}) \tag{4.7}$$

$$R_{cap}^{SA} = \delta_{SA}.(1 - R_{cap}) \tag{4.8}$$

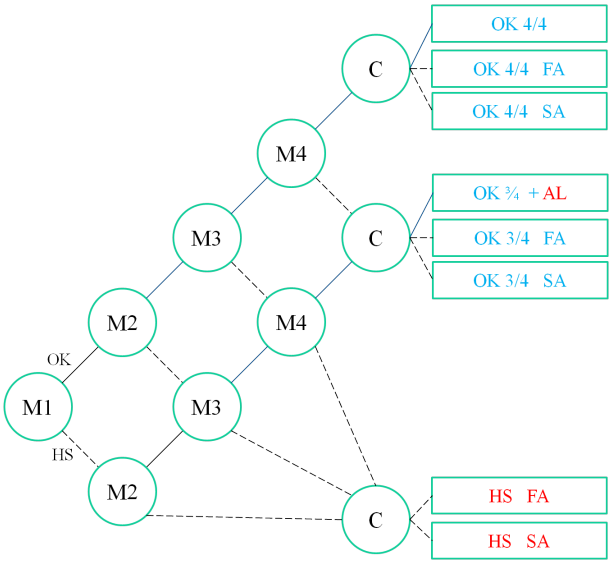


FIGURE 4.19 – *Arbre de décision décrivant les différents états du système de convoyeur*

La fiabilité du système sur la mission entre t et $t + d$ sera donc exprimée à l'aide de la probabilité conditionnelle suivant les expressions ci-dessous :

R(Mission)=

$$Pr(\text{Système OK à } (t+d) \mid \text{Système OK sans alarme à } t) \tag{4.9}$$

Le système de convoyeur est disponible pour la mission (OK) sans alarme à l'instant t lorsque :

- E_1 : 4 Composants OK et Capteur OK (Fonctionnement normal sans alarme SA)
- E_2 : 4 Composants OK et Capteur HS (Fonctionnement dégradé sans alarme SA)
- E_3 : 3 Composants OK et Capteur HS (Fonctionnement dégradé sans alarme SA)

$$\Rightarrow \quad \text{R(Mission)} = Pr(\text{Système OK à } (t+d) \mid \text{Système est dans l'état } E_i \text{ à } t) \tag{4.10}$$

Selon les états décrits ci-dessus, cela peut donner :

R(Mission)=

$$\frac{\sum_i Pr(\text{Système OK à } (t+d) \cap \text{Système est dans l'état } E_i \text{ à } t)}{\sum_i Pr(\text{Système est dans l'état } E_i \text{ à } t)} \tag{4.11}$$

R(Mission)=

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

$$\frac{Pr(\text{Système OK à } (t+d) \cap \text{Système est dans l'état } E_1 \text{ à } t)}{Pr(E_1) + Pr(E_2) + Pr(E_3)} + \frac{Pr(\text{Système OK à } (t+d) \cap \text{Système est dans l'état } E_2 \text{ à } t)}{Pr(E_1) + Pr(E_2) + Pr(E_3)} + \frac{Pr(\text{Système OK à } (t+d) \cap \text{Système est dans l'état } E_3 \text{ à } t)}{Pr(E_1) + Pr(E_2) + Pr(E_3)} \quad (4.12)$$

Les formules précédentes permettent d'estimer la fiabilité de la mission entre t et $t + d$, à chaque instant. Cette fiabilité est comparée avec la valeur de référence qui permet ensuite de déterminer, à l'aide de l'algorithme, si le système nécessite une opération de maintenance et de déterminer les composants concernés dans un ordre et une stratégie permettant de maintenir le niveau de fiabilité souhaité avec les solutions de maintenance les moins chères sur l'intégralité de la durée de vie. Avec une évolution dynamique de l'algorithme, le tableau suivant permet d'afficher les actions de maintenance proposées par la méthode ; les paramètres suivants sont employés pour le développement informatique.

Loi de fiabilité	$R(t) = exp(-\int_0^t \lambda(x)dx)$	Exponentielle
Seuil de fiabilité	$R_{sp} = 0.9500$	
Taux initial des défaillances	$\lambda_{in}(M_1) = 1 \times 10^{-5}$	
	$\lambda_{in}(M_2) = 2 \times 10^{-5}$	
	$\lambda_{in}(M_3) = 3 \times 10^{-5}$	
	$\lambda_{in}(M_4) = 4 \times 10^{-5}$	
	$\lambda_{in}(Cap) = 1 \times 10^{-6}$	
Pente	$P = 1 \times 10^{-7}$	
Taux des défaillances	$\lambda = \lambda_{in} + \hat{\text{A}}\text{ge} * P$	
Durée de mission	$d = 100$	unité de temps
Coûts d'inspection	$C_{ins} = 20$	unités
Coûts de remplacement	$C_{remp} = 100$	unités

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

TABLE 4.6 – *Déroulement de la méthode avec la prise en compte des modes de dysfonctionnement du capteur, pour une mission périodique de* 100 *unités de temps*

Temps	*R(Mission)* Avant Op.	Intervention	*R(Mission)* Après Op.
0	0.98766	Pas d'action	
100	0.97840	Pas d'action	
200	0.96930	Pas d'action	
300	0.96037	Pas d'action	
400	0.95164	Pas d'action	
500	0.94314	Remp : M3	0.94898
		Remp : M1	0.95911
600	0.95663	Pas d'action	
700	0.94822	Remp : M4	0.95770
800	0.95438	Pas d'action	
900	0.94623	Remp : M2	0.95918
1000	0.95593	Pas d'action	
1100	0.94798	Remp : M3	0.95380
1200	0.95070	Pas d'action	
1300	0.94322	Remp : M1	0.95232
1400	0.94937	Remp : M4	0.95671
1500	0.95377	Pas d'action	
1600	0.94676	Remp : M2	0.95394
1700	0.95120	Pas d'action	
1800	0.94475	Remp : M3	0.95178
1900	0.94926	Remp : M1	0.95474
2000	0.95227	Pas d'action	
2100	0.94662	Remp : M4	0.95324
2200	0.95101	Pas d'action	
2300	0.94603	Remp : M2	0.95255
2400	0.95060	Pas d'action	
2500	0.94637	Remp : M3	0.95266
2600	0.95099	Pas d'action	
2700	0.94752	Remp : M1	0.95475
2800	0.95334	Pas d'action	
2900	0.95055	Pas d'action	
3000	0.94828	Remp : M4	0.95574
3100	0.95476	Pas d'action	
3200	0.95297	Pas d'action	
3300	0.95149	Pas d'action	
3400	0.95014	Pas d'action	
3500	0.94875	Remp : M2	0.95916
3600	0.95862	Pas d'action	
3700	0.95741	Pas d'action	
3800	0.95593	Pas d'action	
3900	0.95404	Pas d'action	
4000	0.95164	Pas d'action	
4100	0.94870	Remp : M3	0.96490
4200	0.96413	Pas d'action	
4300	0.96156	Pas d'action	
4400	0.95839	Pas d'action	

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Rappelons que l'objectif de ce chapitre consiste à sélectionner l'architecture optimale du système, en utilisant un modèle du système qui prend en compte les modes de dysfonctionnement possibles du capteur. Ce modèle réagit spécialement au niveau du calcul des taux d'apparition de chaque mode. Comme nous avons présenté à la comparaison précédente des deux systèmes (initial et modifié), je vais décrire ci-après une simulation de déroulement de la méthode pendant une période assez considérable, toujours à l'aide de la simulation Monte-Carlo. Les statistiques nécessaires pour la comparaison sont citées ci-dessus, elles permettent facilement d'observer les bénéfices acquis du changement de la structure du système. Dans cette observation, on trouve toujours que le système amélioré est plus capable de diminuer les frais de maintenance sur la période considérée. A partir de ces données, le concepteur est capable de choisir l'architecture du système. Les paramètres suivants sont utilisés pour la simulation.

Loi de fiabilité	$R(t) = exp(-\int_0^t \lambda(x)dx)$	Exponentielle
Seuil de fiabilité	$R_{sp} = 0.9900$	
Taux initial des défaillances	$\lambda_{in} = 5 \times 10^{-5}$	
Pente	$P = 1 \times 10^{-7}$	
Taux des défaillances	$\lambda = \lambda_{in} + \hat{\text{A}}\text{ge} * P$	
Durée de mission	$d = 100$	unité de temps
Coûts d'inspection	$C_{ins} = 20$	unités
Coûts de remplacement	$C_{remp} = 100$	unités

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

TABLE 4.7 – *Simulation de Monte-Carlo pendant une période de 150000 unités de temps appliquée sur le processus d'optimisation de maintenance du système de convoyeur en considérant les modes de dysfonctionnement du capteur*

Structure modifié		Structure modifiée	
Temps	*Défaillance*	*Temps*	*Défaillance*
5200.0 : M3		99700.0 : M1	
6800.0 : M4		100500.0 : M3	
8800.0 : M1		102600.0 : M3	
12100.0 : M1		102800.0 : M3	
18700.0 : M4		103100.0 : M4	
18900.0 : M3		103900.0 : M2	
20200.0 : M1		104000.0 : M3	
25900.0 : M1		105700.0 : M4	
27000.0 : M4		106900.0 : M3	
29500.0 : M2		108000.0 : M1	
34600.0 : M3		109100.0 : M2	
37400.0 : M4		110400.0 : M2	
38900.0 : M2		111100.0 : M1	
40300.0 : M2		111700.0 : M3	
42200.0 : M2		113600.0 : M2	
42600.0 : M2		114000.0 : M1	
45200.0 : M1		115200.0 : M1	
48700.0 : M4		116700.0 : M2	
50200.0 : M4		117900.0 : M1	
51700.0 : M1		118500.0 : M1	
52400.0 : M4		119200.0 : M2	
54900.0 : M4		119300.0 : M1	
55500.0 : M2		119600.0 : M4	
57600.0 : M1		121100.0 : M1	
60700.0 : M1		121700.0 : M4	
62600.0 : M3		127500.0 : M1	
64500.0 : M1		129200.0 : M4	
68000.0 : M1		129900.0 : M3	
70900.0 : M1		130100.0 : M4	
73200.0 : M1		132700.0 : M4	
73900.0 : M3		133500.0 : M3	
75000.0 : M1		135800.0 : M1	
79700.0 : M2		136600.0 : M1	
81800.0 : M2		136600.0 : M2	
84000.0 : M2		Défaillance du système	
85600.0 : M2		Défaillance du système	
87900.0 : M4		138100.0 : M1	
88500.0 : M3		140600.0 : M1	
90900.0 : M2		142000.0 : M1	
91500.0 : M1		143100.0 : M2	
92000.0 : M3		144100.0 : M4	
93500.0 : M1		145700.0 : M1	
95100.0 : M1		147300.0 : M4	
98500.0 : M2		149300.0 : M1	

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

	Initiale	Modifiée
Temps de simulation	150000	
Remplacement	450	254
Inspection et remplacement	0	27
Inspection sans remplacement	0	42
Défaillances	12	2
Coûts totaux	47400	27180

Dans ce dernier tableau, et selon la stratégie de maintenance pendant cette période de 150000 unités de temps, on constate que le nombre des défaillances est beaucoup moins important dans le système amélioré que dans le système initial, on aurait besoin de réaliser plus d'inspections, mais beaucoup moins de remplacements en même temps. Le composant ajouté peut coûter un peu plus cher au niveau des coûts d'architecture, mais par contre, cela porte une amélioration remarquable assez importante sur les coûts globaux de maintenance sur l'ensemble de la durée de vie. Ce fait conduit à diminuer les coûts globaux de maintenance sur la totalité de la période, et permet donc de choisir l'architecture optimale (représentée ici par l'architecture modifiée).

4.2 Conclusion du chapitre

En conclusion de cet exemple, un système r/n a été considéré dans le processus de détermination de l'architecture optimale, où, $(r, n \in \mathbb{R})$, et $(1 \leq r < n)$; le système qui représente un convoyeur pneumatique, doit effectuer sa mission entre t et $t + d$ avec une fiabilité souhaitée R_{sp} ; la mission peut être périodique ou non-périodique selon le besoin et les conditions de fonctionnement du système. Nous avons fourni les tableaux qui présentent les listes des actions de maintenance capables de maintenir le système dans un état de parfait fonctionnement jusqu'à la fin de chaque mission en optimisant les coûts de maintenance. Une modification a été réalisée au niveau de la structure du système, afin de comparer l'apport mené au processus d'optimisation ; une comparaison entre les deux architectures des systèmes permet de sélectionner l'architecture qui contribue au meilleur apport aux coûts globaux de maintenance sur la durée de vie du système.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Conclusion générale

Au cours de cette thèse, nous avons proposé une méthode de conception qui contribue à augmenter la disponibilité et la sûreté des systèmes conçus ; la méthode convient à la conception des système d'automatisation pour objectifs de maintenance et de fiabilité. Un système conçu de cette manière permet de garantir la mission pour laquelle il a été produit ; de plus, les reprises de maintenance sont efficacement distribuées sur l'intégralité de la vie utile du système, aucune opération de maintenance ne sera effectuée sans utilité. Ce fait permet de fournir une liste des actions de maintenance qui peuvent être considérées comme des actions optimales (En prenant en compte les deux aspects, coûts et utilité). En se basant sur cette méthodologie de détermination des actions de maintenance, on a pu déterminer une architecture optimale du système, et qui est capable de fournir la mission du système avec l'économie souhaitée par rapport aux actions de maintenance au cours de la vie du système.

Dans un premier temps au premier chapitre, il était indispensable de réunir la généralité des termes et des notions utiles dans le domaine, afin d'assurer l'initialisation de la problématique et bien démarrer dans l'ingénierie de fiabilité. Après avoir cité les notions fondamentales de la science de fiabilité et maintenance, on a décrit les méthodes d'optimisation de maintenance sous le même terme ; ce qui explique le choix de la problématique, et qui donne une vue globale des méthodologies de recherche existantes. Le deuxième chapitre présente le problème de recherche, partant de plusieurs hypothèses, pour pouvoir comparer nos objectifs à ceux des autres méthodes de conception et d'optimisation dans le même domaine ; cette comparaison peut mettre au clair la contribution de la thèse. Les étapes de la méthode de détermination des actions de maintenance ont été enchaînées ultérieurement ; expliquant en détails chaque démarche, la méthode a permis d'obtenir la liste des actions de maintenance les plus convenables à effectuer lors de l'intervention considérant des coûts minimum et une fiabilité maximum pour chaque durée de mission. Une application explicative a été fournie pour exposer la méthode, un système de 3/4 a été présenté, l'objectif de base est de fournir la liste des actions à faire pendant une intervention de maintenance et pour une mission définie. Basé sur l'optimisation précédente et les objectifs respectés de sûreté et de coûts, on a décrit la méthode de conception du système afin d'adop-

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

ter une architecture dite optimale qui favorise les actions de maintenance les moins coûteuses et qui est capable de garder un niveau défini de sûreté de fonctionnement.

Cette description détaillée des exemples du système étudié facilite la compréhension de la méthode, et contribue au processus de conception des systèmes (fortement utile pour des systèmes d'automatisation). Les concepteurs peuvent se baser sur cette méthodologie afin de construire leur base de sélection de l'architecture optimale d'un système pour certains objectifs qui minimisent les coûts de maintenance ; de plus,la méthode est un moyen, pour les concepteurs, de créer les bases des données nécessaires pour les techniciens de maintenance qui seront facilement invités à intervenir au bon moment et avec les propres actions de maintenance.

Perspectives

Cette étude de thèse a ouvert plusieurs autres possibilités d'approfondir la recherche dans ce domaine ; je vais aborder ce point dans cette section.

Conception pour la sécurité :

La méthode de conception proposée dans cette thèse peut facilement servir pour traiter des problèmes liés à la sécurité des installations ; dans ce cas là, les critères de sélection de l'algorithme seront toujours les coûts de maintenance et le seuil de fiabilité (qui favorise un fonctionnement sûr du système), mais aussi on garantit un fonctionnement sécurisé des installations et de l'environnement qui enveloppe le système. Comme exemple, si on parle des systèmes multi-états, qui comportent des modes des dysfonctionnements dits "dégradés", le moment d'occurrence d'une défaillance du système n'intéresse pas autant que d'avoir une idée sur les différents états du système pendant la période de fonctionnement, leurs probabilités d'occurrence et leurs modes associés. La transition entre les différents modes peut facilement affecter la sécurité du système et son environnement du point de vue fonctionnel et humain. L'optimisation des actions de maintenance, dans ce cas, vise à maintenir le système en état de bon fonctionnement à un niveau de fiabilité bien défini et à maintenir la disponibilité du système ; ainsi les actions de maintenance proposées à l'aide de la méthode vont garantir un niveau de sécurité qui assure le fonctionnement et l'environnement du système.

Pour empêcher l'occurrence de ces deux problèmes de non-conformité, le système est équipé par un sous-système de contrôle de niveau, composé d'un capteur C qui mesure le niveau du produit suivant la pression au fond de la cuve pour éviter une vidange accidentelle ; et d'un détecteur de niveau D installé à une hauteur maximale requise pour éviter un débordement de produit de la cuve. Le détecteur et le capteur agissent sur

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

un relais R attaché au circuit de démarrage de la pompe P ce qui permet de couper l'alimentation de produit dans la cuve, ou bien alimenter la pompe et remplir la cuve par le produit. Le système est illustré dans la figure ci-après (Fig. 4.20).

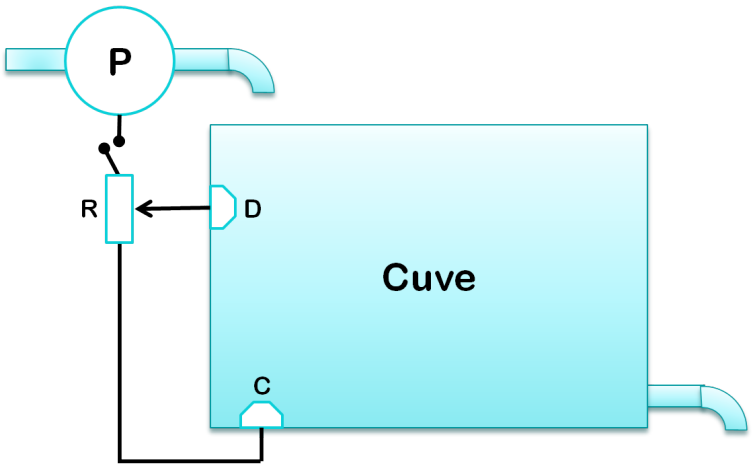


FIGURE 4.20 – *Système de la cuve*

Dans ce système, deux modes des défaillances sont observés, le débordement du produit et la vidange intempestive de la cuve ; ces deux modes passent par un mode de non-sécurité où le fonctionnement n'est plus sûr, on risque d'avoir à tout moment l'un des deux modes. Ce problème peut être traité par une modélisation des séquences des défaillances.

Défaillance $\Leftrightarrow$ Mode 1 $\wedge$ Cause 1 $\longrightarrow$ Mode 2 $\wedge$ Cause 2

Considération de la dégradation du système :

L'étude réalisée dans la thèse considère les défaillances catalectiques des composants ; mais dans certains autres systèmes (par exemple, les systèmes mécaniques), on modélise en se basant sur les conditions de fonctionnement. Les opérations de maintenance seront réalisées à des niveaux prédéterminés de certains objectifs comme la dégradation des composants ou de système, ou le niveau de performance, .etc. En même temps, la décision est prise à l'aide d'un seuil spécifique de fonctions objectives comparé aux informations obtenues par la surveillance des variables de l'état du système. Dans ce cas là, la maintenance est exécutée pour déterminer la capacité du l'élément surveillé à poursuivre dans son état avant d'avoir un problème. Les phénomènes de dégradation sont modélisés par un processus Gamma.

$$\Gamma(x) = \int_0^{+\infty} u^{x-1} e^{-u} du \tag{4.13}$$

Pour approcher des modèles basés sur ce types dans notre méthode de conception, les états des composants du systèmes doivent être estimés et comparés à des seuils prédéfinis pour le pronostic. Ensuite, il s'agit d'uti-

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

liser ces modèles dans la maintenance (ici conditionnelle) pour enfin trouver un compromis lié aux coûts de la maintenance pendant l'intégralité de la vie du système, qui peuvent être ici la réparation ou le remplacement des composants (maintenance corrective et préventive), mais aussi lié aux coûts du temps perdu pour réaliser la maintenance.

Ces modèles sont souvent traités par les méthodes dynamiques de modélisation qui permettent d'estimer l'état.

Considération de la réparation des composants remplacés :

Tandis qu'on considère des composants non-réparables dans cette thèse, il est toujours possible de traiter, dans les étapes de la recherche future, des composants réparables cela permet d'augmenter la capacité de fonctionnement du système avec une diminution des coûts de maintenance issus du prix des composants remplacés.

Détermination de la capacité du système à poursuivre le fonctionnement :

Dans cette thèse on détermine les actions de maintenance selon l'algorithme proposé ; il est toujours possible d'améliorer l'algorithme pour déterminer si le système est capable de poursuivre son fonctionnement le plus loin possible. Cela consiste en modifier l'algorithme pour que la mission soit traitée d'une manière consécutive, c'est à dire, d'estimer la fiabilité de la mission et celle de la mission suivante dans le planning de fonctionnement du système et ensuite déterminer quelle combinaison des composants peut introduire la meilleure stratégie de l'opération de maintenance à l'instant d'inspection.

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Annexes

A

Sommaire

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

A.1 Lois d'algèbre de Boole

.

X, Y, Z, E Des variables boolé nnes.

Loi commutative

$$X.Y = Y.X$$
$$X + Y = Y + X$$

Loi associative

$$X.(Y.Z) = (X.Y).Z$$
$$(X + Y) + Z = X + (Y + Z)$$

Loi distributive

$$X.(Y + Z) = X.Y + X.Z$$
$$X + Y.Z = (X + Y).(X + Z)$$

Loi d'absorption

$$X + (X.Y) = X$$
$$X.(X + Y) = X$$

Idempotence

$$X.X = X$$
$$X + X = X$$

Distributivité

$$X.(Y + Z) = X.Y + X.Z$$
$$X + (Y.Z) = (X + Y)(X + Z)$$

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Opérateurs logiques

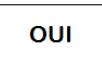
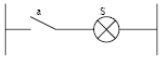
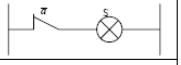
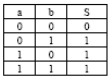
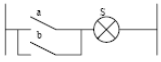
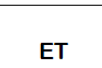
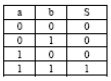
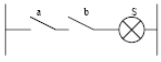
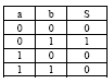
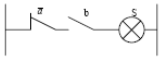
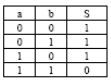
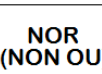
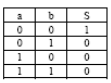
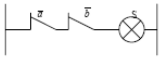
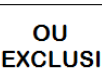
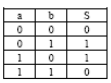
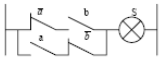
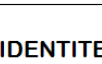
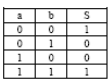
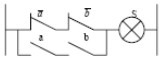
Opérateur	Equation logique	Symbol AFNOR	Symbol ASGS	Table de vérité	Schéma à contact
OUI	$S = a$				
NON	$S = \overline{a}$				
OU	$S = a + b$				
ET	$S = a.b$				
INHIBITION	$S = \overline{a}.b$				
NAND (NON ET)	$S = \overline{a.b} = \overline{a} + \overline{b}$				
NOR (NON OU)	$S = \overline{a + b} = \overline{a}.\overline{b}$				
OU EXCLUSIF	$S = a \oplus b$				
IDENTITE	$S = \overline{a \oplus b}$				

FIGURE A.1 – *Opérateurs logiques (wikimeca.org)*

A.2 LOIS DE PROBABILITÉ

Si X est un événement aléatoire, on peut lui associer un indicateur X_i, où :

$X_i = 1$ si l'évènement existe
$X_i = 0$ si l'évènement n'existe pas

La probabilité d'occurrence de l'événement X est :

$$P(X) = \lim_{s \to \infty} (\frac{S}{s}) \tag{A.1}$$

où ; S est le nombre global des essais, et s le nombre des répétitions

La probabilité d'occurrence de l'événement X_i est :

$$0 \leq P(X_i) \leq 1$$

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

La probabilité de l'intersection de plusieurs évènements indépendants $X_1, X_2, X_3, ..., X_n$ est :

$$P(X_1.X_2.X_3...X_n) = P(X_1).P(X_2).P(X_3)...P(X_n)$$

où n est le nombre d'évènements
La probabilité d'union de plusieurs évènements indépendants $X_1, X_2, X_3, ..., X_n$ est :

$$P(X_1 + X_2 + X_3 + ... + X_n) = 1 - \prod_{i-1}^{n}(1 - P(X_i) \tag{A.2}$$

La négation

La négation de l'évènement X_i est donné par $\overline{X_i} = 1 - X_i$ et donc :
$X_i + \overline{X_i} = 1$

L'union

L'évènement $X \cup Y$ est l'union des deux évènements X et Y, où :
$X \cup Y = \quad 1 \quad$ Si l'un des deux évènements existe
$E_{X \cup Y} = \quad 1 - (1 - E_X)(1 - E_Y)$

$$X \cup X = X$$
$$X \cup Y = Y \cup X$$
$$X \cup (Y \cup Z) = (X \cup Y) \cup Z = X \cup Y \cup Z$$
$$X \cup \phi = X$$

L'intersection

L'évènement $X \cap Y$ est l'intersection des deux évènements X et Y, où :
$X \cap Y = \quad 1 \quad$ Si les deux évènements existent en même temps
$E_{X \cap Y} = \quad E_X.E_Y$

$$X \cap X = X$$
$$X \cap Y = Y \cap X$$
$$X \cap (Y \cap Z) = (X \cap Y) \cap Z = X \cap Y \cap Z$$
$$X \cap \phi = \phi$$

Différence d'évènements

$$P(X \setminus Y) = P(X) - P(X \cap Y)$$
$$\text{Si } Y \subseteq X, \text{donc : } P(X) = P(X) - P(Y)$$

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

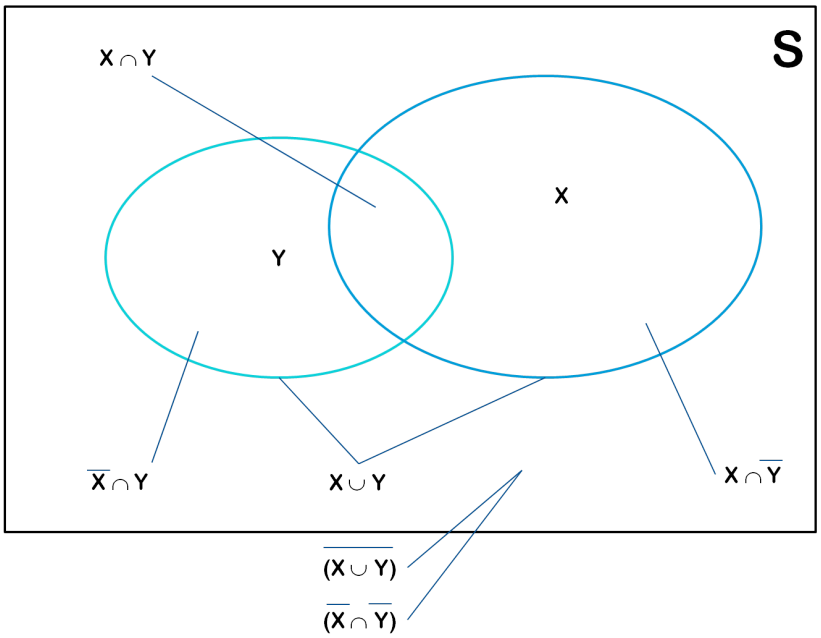


FIGURE A.2 – *X et Y des évènements de S*

Lois de De Morgan

$$\overline{(X \cup Y)} = \overline{X} \cap \overline{Y}$$
$$\overline{(X \cap Y)} = \overline{X} \cup \overline{Y}$$

Lois diverses

$$X \cup \overline{X} = U$$
$$X \cap \overline{X} = \phi$$
$$\overline{(\overline{X})} = X$$
$$\overline{U} = \phi$$
$$\overline{\phi} = U$$
$$X = (X \cap Y) \cup (X \cap \overline{Y})$$

La probabilité conditionnelle

Si les deux évènements sont reliés, on aura besoin de calculer la probabilité de l'évènement X mais sachant que l'évènement Y est déjà arrivé ; cela nous donne la probabilité conditionnelle $P(X|Y)$:

$$P(X|Y) = \frac{P(X \cap Y)}{P(Y)}$$

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

A.3 Statistiques

La moyenne

La moyenne de l'ensemble des instants de défaillance $t_1, t_2, t_3, ..., t_n$ est :

$$t_m = \frac{t_1 + t_2 + t_3 + ... + t_n}{n} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} t_i \tag{A.3}$$

La variance

C'est la mesure de la dispersion statistique de l'ensemble des temps de défaillance :

$$Var = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(t_i - t_m)^2 \tag{A.4}$$

L'écart-type

C'est la valeur qui représente l'écart moyen des temps des défaillance par rapport Ã la moyenne.

$$\sigma = \sqrt{Var}$$

Le médian

C'est l'instant de défaillance qui se situe au milieu de toutes les défaillances :

$$F(t_{\text{médian}}) = 0.5$$

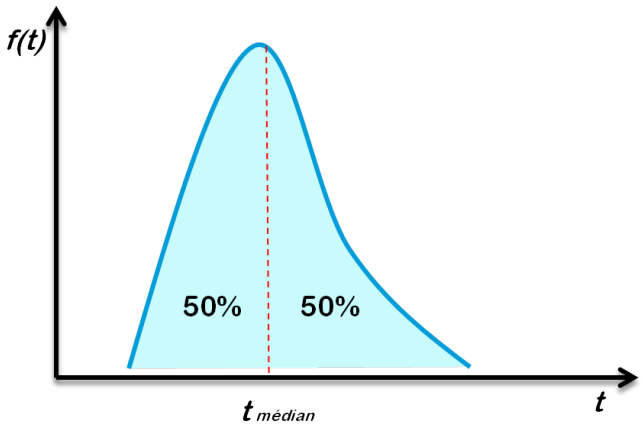


Figure A.3 – *Le médian*

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

Le mode

La valeur de mode décrit le temps où les défaillances se produisent le plus.

$$f'(t_{mode}) = 0$$

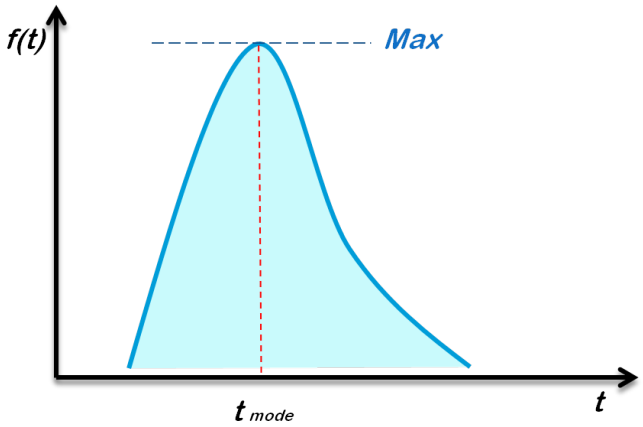


FIGURE A.4 – *Le mode*

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

A.4 Fonctions de distributions

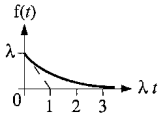
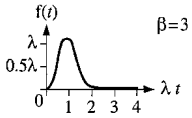
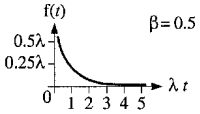
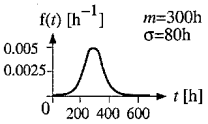
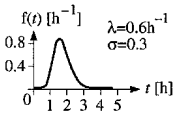
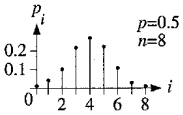
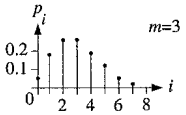
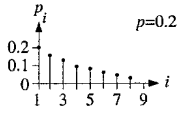
Nom	Fonction de distribution $F(t) = \Pr\{\tau \le t\}$	Densité $f(t) = d\,F(t)/dt$	Paramètres
Exponentiel	$1 - e^{-\lambda t}$		$t \ge 0$ $\lambda > 0$
Weibull	$1 - e^{-(\lambda t)^{\beta}}$		$t > 0,\ F(0) = 0$ $\lambda, \beta > 0$
Gamma	$\frac{1}{\Gamma(\beta)} \int_0^{\lambda t} x^{\beta-1} e^{-x}\, dx$		$t > 0,\ F(0) = 0$ $\lambda, \beta > 0$
Normale	$\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{t} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}\, dx$		$-\infty < t,\ m < \infty$ $\sigma > 0$
Lognormale	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{\ln(\lambda t)}{\sigma}} e^{-x^2/2}\, dx$		$t > 0,\ F(0) = 0$ $\lambda, \sigma > 0$
Binomiale	$\Pr\{\zeta \le k\} = \sum_{i=0}^{k} p_i$ $p_i = \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i}$		$k = 0, \ldots, n$ $0 < p < 1$
Poisson	$\Pr\{\zeta \le k\} = \sum_{i=0}^{k} p_i$ $p_i = \frac{m^i}{i!} e^{-m}$		$k = 0, 1, \ldots$ $m > 0$
Géométrique	$\Pr\{\zeta \le k\} = \sum_{i=1}^{k} p_i = 1 - (1-p)^k$ $p_i = p(1-p)^{i-1}$		$k = 1, 2, \ldots$ $0 < p < 1$

Figure A.5 – *Fonctions de distribution (Bertsche, 2008)*

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Thèse de Ziad Imam, Lille 1, 2015

A.5 Taux des défaillances

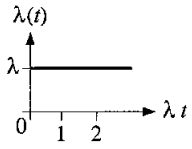
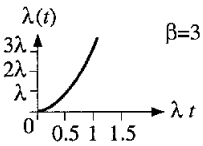
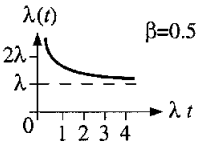
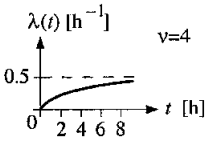
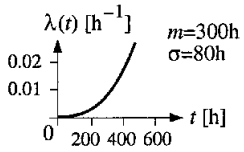
Taux des défaillances $\lambda(t) = f(t) / (1 - F(t))$	Moyenne $\sigma[\tau]$	Variance $Var[\tau]$
	$\frac{1}{\lambda}$	$\frac{1}{\lambda^2}$
	$\frac{\Gamma(1+\frac{1}{\beta})}{\lambda}$	$\frac{\Gamma(1+\frac{2}{\beta}) - \Gamma^2(1+\frac{1}{\beta})}{\lambda^2}$
	$\frac{\beta}{\lambda}$	$\frac{\beta}{\lambda^2}$
	ν	2ν
	m	σ^2

Figure A.6 – *Taux des défaillances (Bertsche, 2008)*

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Notations, acronymes et abréviations

ISO	International Organization for Standardization
ANSI	American National Standards Institute
DIN	Deutsches Institut für Normung
BS	British Standards
EN	European Standards - Norme européenne
NF	Norme Française
AFNOR	L'Association Française de NORmalisation
FD	Fascicule de Documentation
AFIS	Association Française d'Ingénierie Système
SdF	Sûreté De Fonctionnement
IFR	Increasing Failure Rate
MTTF	Mean Time To Failure
MTBF	Mean Time Between Failure
MTTFF	Mean Time To First Failure
MUT	Mean UpTime
MDT	Mean DownTime
MTTR	Mean Time To Repair
AMDEC	Analyse des Modes de Défaillance, de leurs Effets et de leur Criticité
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis
FMECA	Failure mode, effects, and criticality analysis
HACCP	Hazard Analysis Critical Control Point
HAZOP	HAZard And OPerability study
ETA	Event Tree Analysis
ADD	Arbre Des Défaillances
FTA	Failure Tree Analysis
RBD	Reliability Block Diagram
RCM	Reliability Centred Maintenance
RBM	Reliability Based Maintenance
R_{sys}	SYStem Reliability
$R_{mission}$	MISSION Reliability

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

R_{sp}	SPecified Reliability limit
BDD	Binary Decision Diagram
MC, CM	Maintenance Corrective
MP, PM	Maintenance Preventive
OMF	Optimisation de la Maintenance par la Fiabilité
λ	Taux des défaillances
μ	Taux de réparation
t_f	Failure Time
C_{remp}	Coûts de REMPlacement
C_{ins}	Coûts d'INSpection
ABAO	As Bad As Old
AGAN	As Good As New
Pr	Probabilité
pdf	Probability Density Function
$\mathbb{N}$	Ensemble des entiers naturels
$\mathbb{R}$	Ensembles des réels
S	Espace probabilisé

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr

Bibliographies

Al-Najjar, B. (2007). The lack of maintenance and not maintenance which costs: A model to describe and quantify the impact of vibration-based maintenance on company's business. *International Journal of Production Economics*, *107*(1), 260–273.

Amari, S. V, & Pham, H. (2007). A Novel Approach for Optimal Cost-Effective Design of Complex Repairable Systems. *Trans. Sys. Man Cyber. Part A*, *37*(3), 406–415.

Arrow, K. J. (1962). *Studies in Applied Probability & Management Science* (Mathematic.). Stanford University Press.

Aven, T., & Jensen, U. (1999). *Stochastic Models in Reliability* (Applicatio.). Springer.

B. Misra, K. (2008). *Handbook of Performability Engineering*. *Engineering*. Springer-Verlag London Limited.

Barlow, R. E., & Proschan, F. (1975). *Statistical theory of reliability and life testing: probability models* (Internatio.). Holt, Rinehart and Winston.

Barlow, R. E., Proschan, F., & Hunter, L. C. (1996). *Mathematical theory of reliability*. *Wiley New York* (Vol. 17). Society for Industrial Mathematics.

Barlow, R., & Hunter, L. (1960). Optimum Preventive Maintenance Policies. *Operations Research*, *8*(1), 90–100.

Beaurepaire, P., Valdebenito, M. A., Schuëller, G. I., & Jensen, H. A. (2012). Reliability-based optimization of maintenance scheduling of mechanical components under fatigue. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *221–222*(0), 24–40.

Benard, V., Cauffriez, L., & Renaux, D. (2008). The Safe-SADT method for aiding designers to choose and improve dependable architectures for complex automated systems. *Reliability Engineering & System Safety*, *93*(2), 179–196.

Ben-Daya, M., Duffuaa, S. O., & Raouf, A. (2000). *Maintenance, Modeling, and Optimization*. Kluwer Academic Publishers.

Bergman, B. (1978). *Optimal Replacement under a General Failure Model* (Advances i.). Applied Probability Trust.

Bertsche, B. (2008). *Reliability in Automotive and Mechanical Engineering*. *Design*. Springer- Verlag Berlin Heidelberg.

Besnard, D., Gacek, C., & B. Jones, C. (2006). *Structure for dependability: Computer-Based Systems from an Interdisciplinary Perspective*. *Perspective*. Springer.

Bordes, L., Paroissin, C., & Salami, A. (2009). Un modèle de dégradation basé sur un processus gamma et le mouvement brownien Introduction et modèle Estimation des paramètres, 1–4.

Caputo, A., Pelagagge, P., & Salini, P. (2011). Joint economic optimization of heat exchanger design and maintenance policy. *Applied Thermal Engineering*.

Castanier, B., Grall, A., & Bérenguer, C. (2005). A condition-based maintenance policy with non-periodic inspections for a two-unit series system. *Reliability Engineering & System Safety*, *87*(1), 109–120.

Certa, A., Galante, G., Lupo, T., & Passannanti, G. (2011). Determination of Pareto frontier in multi-objective maintenance optimization. *Reliability Engineering & System Safety*, *96*.

Chan, L.-Y., & Wu, S. (2009). Optimal design for inspection and maintenance policy based on the CCC chart. *Computers & Industrial Engineering*, *57*(3), 667–676.

© 2015 Tous droits réservés.

Chang, C.-C., Sheu, S.-H., & Chen, Y.-L. (2013). Optimal replacement model with age-dependent failure type based on a cumulative repair-cost limit policy. *Applied Mathematical Modelling*, *37*(1–2), 308–317.

Chapouille, P. (2005). Maintenabilité, Maintenance. *Techniques de L'ingénieur. L'Entreprise Industrielle*, (1282-9072).

Charles, A.-S., Floru, I.-R., Azzaro-Pantel, C., Pibouleau, L., & Domenech, S. (2003). Optimization of preventive maintenance strategies in a multipurpose batch plant: application to semiconductor manufacturing. *Computers & Chemical Engineering*, *27*(4), 449–467.

Chien, Y.-H. (2010). Optimal age for preventive replacement under a combined fully renewable free replacement with a pro-rata warranty. *International Journal of Production Economics*, *124*(1), 198–205.

Clarhaut, J., Conrard, B., Hayat, S., & Cocquempot, V. (2009). Optimal Design of Dependable Control System Architectures Using Temporal Sequences of Failures. *IEEE Transactions on Reliability*, *58*(3), 511–522.

Dhillon, B. S. (1999). *Design Reliability - Fundamentals and Applications*. *Quality and Reliability Engineering International*. Ottawa, Ontario, Canada: CRC Press LLC.

Dhillon, B. S. (2006). *Maintainability, Maintenance, and Reliability for Engineers*. Boca Raton: CRC Taylor & Francis Group, LLC.

Dummer, G. W. A., Tooley, M. H., & Winton, R. C. (1997). *An elementary guide to reliability ,. Quality and Reliability Engineering International* (5th editio., Vol. 13). Butterworth-Heinemann.

Frangopol, D. M., & Maute, K. (2003). Life-cycle reliability-based optimization of civil and aerospace structures. *Computers & Structures*, *81*(7), 397–410.

Fyffe, D. E., Hines, W. W., & Lee, N. K. (1968). System Reliability Allocation and a Computational Algorithm. *Reliability, IEEE Transactions on*.

Garg, H., & Sharma, S. . (2012). Multi-objective reliability-redundancy allocation problem using particle swarm optimization. *Omputers & Industrial Engineering*, *64*.

Gertsbakh, I. B. (1977). *Models of preventive maintenance* (Studies in.). North-Holland.

Ghosh, D., & Roy, S. (2009). Maintenance optimization using probabilistic cost-benefit analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *22*(4), 403–407.

Gnedenko, B. V, K, B. I., & Solovev, A. D. (1969). *Mathematical methods of reliability theory* (Probabilit.). Academic Press.

Goel, H. D., J, G., & Weijnen, M. p c. (2003). Integrated optimal reliable design, production, and maintenance planning for multipurpose process plants. *Computers & Chemical Engineering*, *27*.

H Eriksen, J., Nona, R. A., & Nsa, C. (2001). *Guidance for Writing NATO R&M Requirements Documents*.

Hongzhou, W., & Hoang, P. (2006). *Reliability and optimal maintenance*. (P. Hoang, Ed.).

HotWire. (2003, April). Reliability Hot Wire - The eMagazine for the Reliability Professional, Issue 26.

Hu, H., Cheng, G., Li, Y., & Tang, Y. (2009). Risk-based maintenance strategy and its applications in a petrochemical reforming reaction system. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *22*(4), 392–397.

Huynh, K. T., Castro, I. T., Barros, A., & Bérenguer, C. (2012). Modeling age-based maintenance strategies with minimal repairs for systems subject to competing failure modes due to degradation and shocks. *European Journal of Operational Research*, *218*(1), 140–151.

© 2015 Tous droits réservés.

Imam, Z., Conrard, B., & Bayart, M. (2012). Optimization of Maintenance Actions for a Multi-Component Control System and for Planned Mission Duration. In *2nd IFAC Workshop on Advanced Maintenance Engineering, Service and Technology, A-Mest'12*. Seville.

Imam, Z., Conrard, B., & Bayart, M. (2013). Optimization of control system structure based on maintenance. In *International Symposium on Security and Safety of complex systems 2SCS*. ENSA, Agadir Maroc.

Jardine, A. K. S., Goldrick, T. S., & Stender, J. (1976). The Use of Annual Maintenance Cost Limits for Vehicle Fleet Replacement. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers , 190* (1), 71–80.

Jayabalan, V., & Chaudhuri, D. (1992). Cost optimization of maintenance scheduling for a system with assured reliability. *Reliability, IEEE Transactions on*. doi:10.1109/24.126665

Kančev, D., & Čepin, M. (2011). Evaluation of risk and cost using an age-dependent unavailability modelling of test and maintenance for standby components. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, *24*(2), 146–155.

Kelly, A. (1989). *Maintenance and its management*. Conference Communication.

Kim, C. S., Djamaludin, I., & Murthy, D. n. . (2004). Warranty and discrete preventive maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, *84*.

Laggoune, R., Chateauneuf, A., & Aissani, D. (2009). Opportunistic policy for optimal preventive maintenance of a multi-component system in continuous operating units. *Computers & Chemical Engineering*, *33*(9), 1499–1510.

Lapa, C. M. F., Pereira, C. M. N. A., & de Barros, M. P. (2006). A model for preventive maintenance planning by genetic algorithms based in cost and reliability. *Reliability Engineering & System Safety*, *91*(2), 233–240.

Levett, D. Z., Martin, D. S., Wilson, M. H., Mitchell, K., Dhillon, S., Rigat, F., … Research Group, C. X. E. (2010). Design and conduct of Caudwell Xtreme Everest: an observational cohort study of variation in human adaptation to progressive environmental hypoxia. *BMC Medical Research Methodology*, *10*(1), 98.

Limbourg, P. (2008). *Dependability Modelling under Uncertainty: An Imprecise Probabilistic Approach*. Springer Publishing Company, Incorporated ©2008.

Lyonnet, P. (2006). *Ingénierie de la fiabilité*. Lavoisier.

McCall, J. (1965). Maintenance Policies for Stochastically Failing Equipment: A Survey. *Management Science*, *11*.

Mital, A., Desai, A., Subramanian, A., & Mital, A. (2008). Designing for Maintenance. In *Product Development*. Butterworth-Heinemann.

Mobley, R. K. (2002). *An Introduction to Predictive Maintenance*. Elsevier Science.

Moghaddam, K. S., & Usher, J. S. (2010). A new multi-objective optimization model for preventive maintenance and replacement scheduling of multi-component systems. *Engineering Optimization*, *43*(7), 701–719.

Moghaddam, K. S., & Usher, J. S. (2011). Preventive maintenance and replacement scheduling for repairable and maintainable systems using dynamic programming. *Computers & Industrial Engineering*, *60*(4), 654–665.

Moghaddass, R., Zuo, M. J., & Pandey, M. (2012). Optimal design and maintenance of a repairable multi-state system with standby components. *Journal of Statistical Planning and Inference*, *142*(8), 2409–2420.

Monga, A., & Zuo, M. j. (1998). Optimal system design considering maintenance and warranty. *Computers & Operations Research*, *25*.

© 2015 Tous droits réservés.

Moradi, E., Fatemi Ghomi, S. M. T., & Zandieh, M. (2011). Bi-objective optimization research on integrated fixed time interval preventive maintenance and production for scheduling flexible job-shop problem. *Expert Systems with Applications*, *38*.

Moss, M. A., & Dekker, M. (1985). Designing for minimal maintenance expense: The practical application of reliability and maintainability. *Uropean Journal of Operational Research*, *28*.

Murthy, D. N. P., & Djamaludin, I. (2002). New product warranty: A literature review. *International Journal of Production Economics*, *79*(3), 231–260.

Nakagawa, T. (2005). *Maintenance Theory of Reliability*. (H. Pham, Ed.). Springer Series in Reliability Engineering.

Niu, G., Yang, B.-S., & Pecht, M. (2010). Development of an optimized condition-based maintenance system by data fusion and reliability-centered maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, *95*(7), 786–796.

Nourelfath, M., & Ait-Kadi, D. (2007). Optimization of series–parallel multi-state systems under maintenance policies. *Reliability Engineering & System Safety*, *92*(12), 1620–1626.

Okasha, N. M., & Frangopol, D. M. (2009). Lifetime-oriented multi-objective optimization of structural maintenance considering system reliability, redundancy and life-cycle cost using GA. *Structural Safety*, *31*(6), 460–474.

Osaki, S. (1985). *Stochastic System Reliability Modeling* (Series in .). World Scientific Pub.

Osaki, S. (1992). *Applied stochastic system modeling*. Springer-Verlag.

Osaki, S. (2002). *Stochastic Models in Reliability and Maintenance*. Springer.

Osaki, S., & Cao, J. (1987). *Reliability theory and applications: proceedings of the China-Japan Reliability Symposium*. World Scientific Pub. Co.

Ozekici, S. (1996). *Reliability and Maintenance of Complex Systems*. (C. and S. S. NATO Asi Series. Series F, Ed.). Springer.

Park, D. H., Jung, G. M., & Yum, J. K. (2000). Cost minimization for periodic maintenance policy of a system subject to slow degradation. *Reliability Engineering & System Safety*, *68*(2), 105–112.

Pellegrin, C. (1997). *Fondements de la d{é}cision de maintenance*. {É}conomica.

Pham, H. (2003). *Handbook of Reliability Engineering*. Springer.

Pistikopoulos, E. N., Vassiliadis, C. G., & Papageorgiou, L. G. (2000). Process design for maintainability: an optimization approach. *Computers & Chemical Engineering*, *24*.

Rausand, M., & Hoyland, A. (2004). *System Reliability Theory-Models, Statistical Methods, and Applications* (Vol. 2).

S. Natkin. (2002). Introduction à la Sûreté De Fonctionnement Des Ordinateurs.

Samrout, M., Yalaoui, F., Châtelet, E., & Chebbo, N. (2005). New methods to minimize the preventive maintenance cost of series–parallel systems using ant colony optimization. *Reliability Engineering & System Safety*, *89*(3), 346–354.

Satow, T., & Osaki, S. (2003). Opportunity-based age replacement with different intensity rates. *Mathematical and Computer Modelling*, *38*(11–13), 1419–1426.

© 2015 Tous droits réservés.

Scarf, P. A., & Cavalcante, C. A. V. (2010). Hybrid block replacement and inspection policies for a multi-component system with heterogeneous component lives. *European Journal of Operational Research*, *206*(2), 384–394.

Shafiee, M., & Chukova, S. (2013). Maintenance models in warranty: A literature review. *European Journal of Operational Research*, *229*(3), 561–572.

Sheu, S.-H., Chang, C.-C., Chen, Y.-L., & Zhang, Z. G. (2010). A Periodic Replacement Model Based on Cumulative Repair-Cost Limit for a System Subjected to Shocks. *Reliability, IEEE Transactions on*. doi:10.1109/TR.2010.2048733

Simonot-Lion, F., Thomesse, J. P., Bayart, M., & Staroswieki, M. (1995). Dependable distributed computer control systems: analysis of the design step activities. In *13th IFAC Workshop on Distributed Control Systems*. Toulouse: IFAC.

Tian, Z., Jin, T., Wu, B., & Ding, F. (2011). Condition based maintenance optimization for wind power generation systems under continuous monitoring. *Renewable Energy*, *36*(5), 1502–1509.

Torres-Echeverría, A. C., Martorell, S., & Thompson, H. A. (2012). Multi-objective optimization of design and testing of safety instrumented systems with MooN voting architectures using a genetic algorithm. *Reliability Engineering & System Safety*, *106*(0), 45–60.

Valdebenito, M. A., & Schuëller, G. I. (2010). Design of maintenance schedules for fatigue-prone metallic components using reliability-based optimization. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, *199*(33–36), 2305–2318.

Vassiliadis, C. ., & Pistikopoulos, E. N. (1998). Reliability and maintenance considerations in process design under uncertainty. *Computers & Chemical Engineering*, *22*.

Villemeur, A. (1988). *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels*.

Wang, & Hongzhou. (2002). A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research*, *139*.

Wang, L., Chu, J., & Mao, W. (2008). A condition-based order-replacement policy for a single-unit system. *Applied Mathematical Modelling*, *32*(11), 2274–2289.

Wang, L., Chu, J., & Mao, W. (2009). A condition-based replacement and spare provisioning policy for deteriorating systems with uncertain deterioration to failure. *European Journal of Operational Research*, *194*(1), 184–205.

Yu-Lan, J. (2012). Multi-objective optimization of flexible period preventive maintenance on a single machine. *ICQR2MSE*.

Zhang, Y. L., Yam, R. C. M., & Zuo, M. J. (2002). Optimal replacement policy for a multistate repairable system. *He Journal of the Operational Research Society*, *53*(Performance Management (Mar., 2002)).

Zhao, X., & Nakagawa, T. (2012). Optimization problems of replacement first or last in reliability theory. *European Journal of Operational Research*, *223*(1), 141–149.

Zio, E. (2007). *An Introduction to the Basics of Reliability and Risk Analysis*. World Scientific Publishing Co. Inc., Singapore.

Zwingelstein, G. (1995). *Diagnostic Des Défaillances - Théorie et Pratique Pour Les Systèmes Industriels*. HERMES.

Zwingelstein, G. (1996). *La Maintenance Basée Sur La Fiabilité*. HERMES.

© 2015 Tous droits réservés.

Titre **L'intégration des Activités de Maintenance dans la Conception des Systèmes d'Automatisation**

Résumé Au cours de la conception des systèmes automatisés, il est impératif de penser à maintenir la performance qui est susceptible de se dégrader au fil du temps. Lors de l'exploitation de tels systèmes, des opérations de maintenance préventive permettent de garder cette performance au dessus d'un niveau requis ; mais en même temps, la réalisation d'un nombre non-étudié de ces interventions, risque d'être un désavantage pour l'intégralité du processus. Il est donc indispensable de réfléchir comment diminuer ces interventions à un nombre optimal, ce qui impose de pratiquer une méthodologie de conception qui organise les opérations de maintenance ; mais aussi, de diminuer le temps perdu en ce qui concerne la détermination des actions à faire lors de l'intervention, et de diminuer le temps perdu suite aux opérations inutiles. Le concepteur est invité à structurer une architecture optimale, capable de réaliser une fonction définie et qui doit permettre au système d'être maintenu, avec moindre dépenses, la performance voulu représentée par un limite de fiabilité à ne pas dépasser.

Mots-clés Conception pour la maintenance et la fiabilité, optimisation de la maintenance préventive, détermination des actions de maintenance

Title **The Integration of Maintenance Actions in the Design Phase of Automation Systems**

Abstract During a design process of automated systems, it's important to think about maintaining performance which will deteriorate over time. During the operation phase of such systems, preventive maintenance can keep this performance over a required level ; in the same time if these actions were not studied, this may be a disadvantage of the entire process. It is therefore necessary to consider how to reduce these interventions into an optimum number during the system life cycle, this fact will require a design methodology able to organize these operations, and to reduce the time lost under the determination of what to do during the maintenance, and time on unnecessary operations. The designer, is therefore invited to structure an optimum system design to achieve a defined function. This design must allow the system to maintain a reliability level with the minimal costs.

Keywords Design for maintenance, design for reliability, preventive maintenance optimization, maintenance actions determination

© 2015 Tous droits réservés.

doc.univ-lille1.fr