

Modélisation de la Fiabilité d'un Système Mécanique à redondance

Salima BELEULMI¹, Ahmed BELLAOUAR², Rachid CHAIB² et Mohammed BENIDIR²

¹ Centre universitaire Abbès lghrou, Khenchela- Algérie

² Département de génie mécanique, Université Mentouri, Constantine- Algérie

Résumé — Pour évaluer la fiabilité d'un système mécanique, il est nécessaire de connaître les modes de défaillance auquel il est soumis. Les systèmes mécaniques sont généralement complexes, et certains requièrent un haut niveau de sécurité et de disponibilité. Une défaillance est un problème grave dont la solution nécessite souvent faire appel des techniques de redondance. La redondance peut être utilisée pour améliorer la fiabilité d'un système sans aucun changement dans la fiabilité des composants individuels qui forment le système. Cet article présente la modélisation de la fiabilité des systèmes complexes caractérisés par des structures montées soit en série soit en parallèle ou combinées.

Keywords- Modélisation, Fiabilité, Redondance, Active, Passive, Taux de Défaillance, disponibilité.

I. INTRODUCTION

L'arrêt total d'un pont roulant, d'une chaîne de convoyage d'un robot... et plus généralement de n'importe quel équipement industriel en fonctionnement sur une ligne de production provoque des sueurs froides à tout exploitant: perte de temps, perte en production, donc d'argent, puis perte de crédibilité auprès des clients de l'entreprise, donc perte d'argent à nouveau etc. C'est un cercle infernal dans lequel, on le comprend aisément, aucun industriel ne souhaite rentrer, d'où l'importance qu'il faut accorder à la très forte demande pour l'évaluation de la fiabilité conformément à la norme de sûreté de fonctionnement.

La fiabilité est une fonction de temps qui estime par des méthodes statistiques l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions données et pour un intervalle de temps donné [1], [2].

L'augmentation de la complexité d'un système mécanique, fait diminuer sa fiabilité [3], [4] si l'on ne prend pas des mesures compensatoires. Un système formé de composants indépendants, c'est-à-dire en série, si un seul des composants est en panne, le système ne fonctionne plus. On dit que le système est sans redondance. La fiabilité de ces systèmes se détériore dramatiquement avec l'augmentation du nombre des composants.

C'est illustré dans la figure 1, les courbes montrent la fiabilité du système en série R_s contenant la fiabilité identique des composants R_i . C'est évident de ces résultats que la fiabilité du système diminue très rapidement quand le nombre de composants en série augmente, particulièrement pour les systèmes dans lesquels les composants n'ont pas de fiabilité individuelle très élevée.

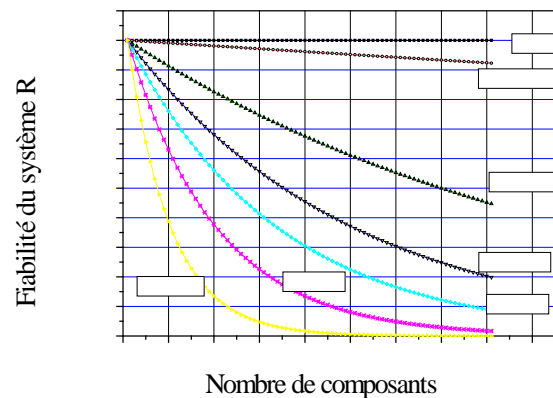


Figure 1. Evolution de la fiabilité

II. REDONDANCE DES MATERIELS

La redondance matérielle est très répandue dans les domaines où la sûreté de fonctionnement est cruciale pour la sécurité des personnes et de l'environnement, comme dans l'aéronautique ou le nucléaire. D'une manière générale, les systèmes réels sont constitués de plusieurs composants et présentent plusieurs modes de défaillance, de tels systèmes sont dits complexes et leur analyse devient plus en plus difficile. Intégrer la redondance dans les systèmes est particulièrement efficace lorsque les défaillances aléatoires prédominent ou dans les systèmes critiques. Ceci suggère qu'une telle technique contribue à l'accroissement de la fiabilité [5], [6].

Un système redondant contient un ou plusieurs composants ou sous-systèmes de veille dans la configuration du système.

Ces unités de réserve permettront au système de continuer à fonctionner lorsque l'unité principale tombe en panne. La défaillance du système se produit uniquement lorsque tout ou partie des unités de secours ne parviennent pas. Par conséquent, la redondance est une technique de conception du système qui peut augmenter la fiabilité du système.

Cette application vise à augmenter la fiabilité totale du système par une disposition en parallèle des composants de fiabilités différentes. La figure 2 montre l'amélioration de la fiabilité du système en fonction du nombre de composants et de leur fiabilité. Néanmoins cette approche reste coûteuse pour les systèmes de faible complexité.

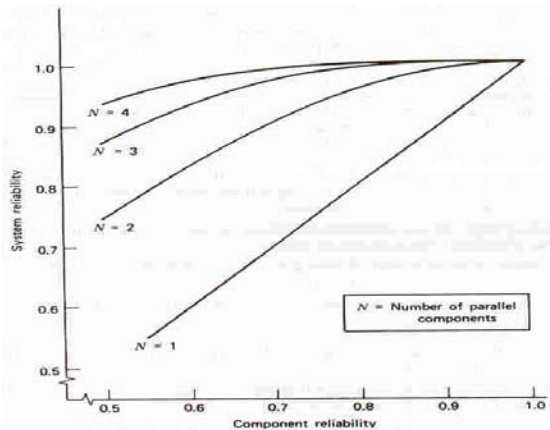


Figure 2. La fiabilité du système en fonction du nombre de composants et leur fiabilité [7].

La redondance consiste donc à disposer plusieurs exemplaires d'un même équipement ou d'un même processus ou de tout autre élément participant à une solution mécanique, électronique ou industrielle [8].

Selon les circonstances elle est utile :

- pour augmenter la capacité totale ou les performances d'un système,
- pour réduire le risque de panne,
- pour combiner ces deux effets.

On distingue trois grandes catégories de redondances dont l'utilisation rend plus fiable le système :

Les redondances actives

Les redondances passives ou (standby)

Les redondances majoritaires (équipements électroniques)

A. LA REDONDANCE ACTIVE

On parle de redondance active, quand tous les éléments fonctionnent en permanence. On distingue la redondance active totale et partielle. La figure (3) schématise un système à redondance active totale qui ne devient défaillant qu'avec la défaillance du dernier élément survivant. Par définition, il s'agit d'un système dans lequel les éléments sont associés en parallèle .

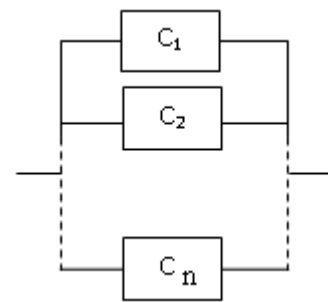


Figure 3. Redondance active totale

Dans le cas de deux composants indépendants à redondance active, la loi de fiabilité du système est déterminée par l'expression suivante :

$$R(t) = e^{-\lambda_1 t} + e^{-\lambda_2 t} - e^{-(\lambda_1 + \lambda_2)t} \quad (1)$$

Si les taux de défaillance sont égaux, le taux de défaillance du système sera :

$$\lambda(t) = -\frac{1}{R} \frac{dR}{dt} = \lambda \left(\frac{1 - e^{-\lambda t}}{1 - 0.5e^{-\lambda t}} \right) \quad (2)$$

On parle de redondance active partielle quand un système comporte n éléments, dont k (k < n) strictement nécessaires pour qu'il fonctionne. Le système peut donc accepter (n-k) défaillances.

A titre d'exemple, Supposons une installation hydraulique comportant trois pompes en parallèle. En réalité, seules deux pompes suffisent pour satisfaire les besoins en débit. Nous pouvons représenter cette installation par le schéma bloc de la figure 4. Pour en calculer la fiabilité, il faut envisager tous les cas possibles pouvant se présenter (figure 5): R1 et R2 bons, R3 défaillant; R1 et R3 bons, R2 défaillant; ...

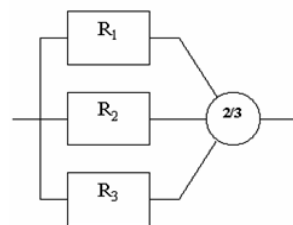


Figure 4. Schéma équivalent 2/3

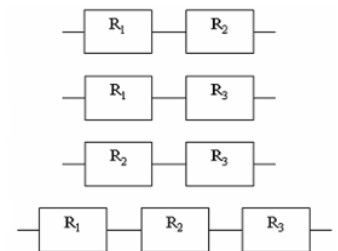


Figure 5. Situations possibles

B. LA REDONDANCE PASSIVE

La redondance est dite passive ou (standby) quand les éléments surabondants ne sont mis en service qu'au moment du besoin; cela signifie que parmi n éléments

seuls m sont en service. Ceci implique que certains éléments seront en attente ou en stock. Le schéma associé au cas $m=1$ et $n=2$, est représenté à la figure 6.

Schématiquement, il faut intervenir une détection de commutation (DC) détectant la mise en service de l'élément en attente quand le composant principal tombe en panne. Les expressions pour le calcul de la fiabilité pour de tels systèmes ont été établis dans [9] et [10].

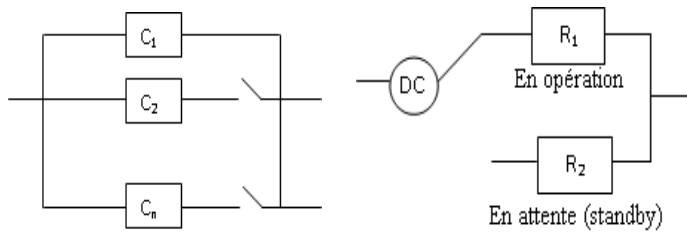


Figure 6. Redondance passive.

Dans ce cas, Il y a deux possibilités:

- a) Le composant principal ne tombe pas en panne, $t_1 > t$.
- b) Le composant principal tombe en panne mais le composant en attente ne tombe pas en panne $t_1 < t$ et $t_2 > t$.

Étant donné, que ces deux possibilités sont mutuellement exclusives, on peut additionner les probabilités. La fiabilité, du système à redondance passive se calcule donc par l'expression suivante :

$$R_s = R_1(t) - \int_0^t R_2(t-t') \cdot \frac{d}{dt'} R_1(t') dt' \quad (3)$$

Dans le cas où on a deux composants avec λ identiques et constants, la fiabilité est donnée par :

$$R_s^2(t) = e^{-\lambda t} \cdot (1 + \lambda t) \quad (4)$$

Le taux de défaillance instantané, en redondance passive, en cas de deux composants avec λ identiques et constant, est calculé par l'expression :

$$\lambda(t) = \frac{\lambda^2 t}{1 + \lambda t} \quad (5)$$

Dans le cas de plusieurs composants en attente (standby), chaque sous système est identique et soumis à la loi exponentielle comme montré à la figure 6, la fiabilité du système est calculée par l'équation :

$$R_s^n(t) = e^{-\lambda t} \sum_{i=0}^{n-1} \frac{(\lambda t)^i}{i!} \quad (6)$$

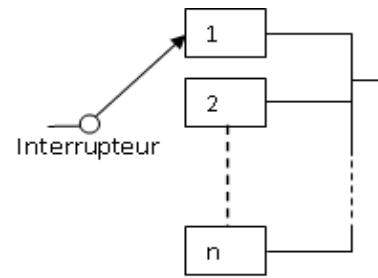


Figure 7. Plusieurs composants en attente.

Les expressions (5) et (6) seront considérées pour calculer la fiabilité et le taux de défaillance des systèmes à plusieurs composants en standby. Ceci montre que la disposition des composants (en redondance active ou passive) dans une chaîne de production influe directement sur la fiabilité et par conséquent sur la disponibilité de l'outil de production.

III. APPLICATIONS

Considérant un système a quatre composants en redondance passifs (avec une détection de commutation parfaite), le taux de défaillance $\lambda = 6,50.10^{-5}$ / heure, $t = 5$ ans sans entretien, on détermine la fiabilité du système et son taux de défaillance pour différents temps de mission (1 à 5 ans).

Ainsi, la fiabilité et le taux de défaillance sont trouvés à partir des expressions suivantes :

$$R_s^4(t) = e^{-\lambda t} \left[1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2} + \frac{(\lambda t)^3}{6} \right] \quad (7)$$

$$= \text{donc} \quad \lambda(t) \quad (8)$$

La Figure 8 représente l'évolution de la fiabilité du système en fonction du temps de service,

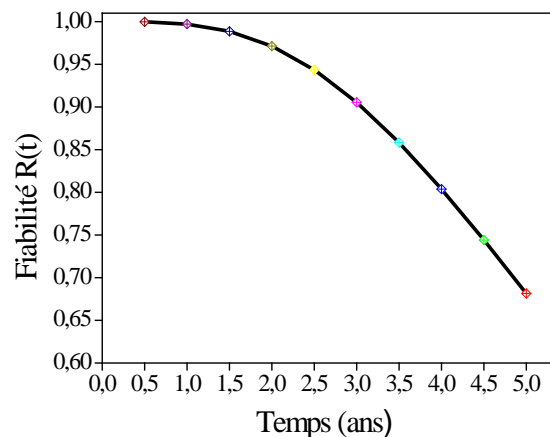


Figure 8. Evolution de la fiabilité.

La figure 9 montre la variation du taux de défaillance du système redondant des quatre composants en parallèle.

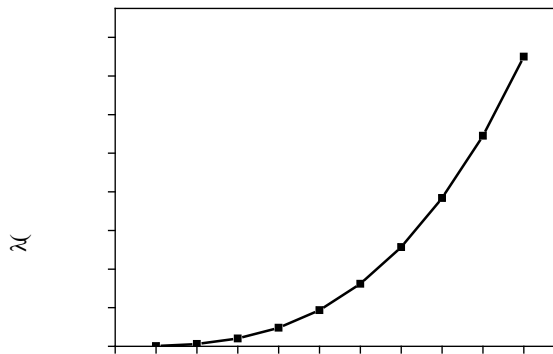


Figure 9. Evolution du taux de défaillance.

La nécessité de disponibilité impose des niveaux supérieurs de fiabilité impliquant une redondance multiples. La loi de fiabilité du système pour N composants en parallèle s'exprime par la relation suivante :

$$R(t) = 1 - \prod_{i=1}^k (1 - e^{-\lambda_i t}) \quad (9)$$

Ainsi, le temps moyen de bon fonctionnement du système jusqu'à la panne (MTTF), est déterminé par l'expression :

$$MTTF = \int_0^{\infty} \left[1 - \prod_{i=1}^k (1 - e^{-\lambda_i t}) \right] dt \quad (10)$$

L'objectif de la redondance multiple est d'augmenter le nombre de composants en parallèle pour améliorer la MTTF. Si pour notre application on veut doubler la MTTF d'un système, la question serait combien faut-il de composants mécaniques à installer. A partir de la distribution binomiale de paramètre p, q et en faisant certaines hypothèses telles que p=1 et q=-R1 on trouve l'expression suivante :

$$MTTF = \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} \frac{C_N^n}{n\lambda_1} \quad (11)$$

Donc :

$$\frac{MTTF_N}{MTTF_1} = \sum_{n=1}^N (-1)^{n-1} \frac{N!}{n(N-n)!n!} \geq 2 \quad (12)$$

Après calcul suivant l'expression (12), on détermine que le nombre de composants nécessaires pour doubler le temps MTTF est égal à 4.

IV. CONCLUSION

En conclusion de ce travail, nous tenons à préciser qu'à travers les applications considérées et l'analyse de la redondance on confirme les objectifs de notre étude:

- L'estimation de la fiabilité des systèmes est un outil précieux qui aide à mieux définir une stratégie de maintenance.
- La redondance passive ou active est un moyen d'augmenter la disponibilité de l'équipement dans la mesure où la disposition des composants et leurs coûts soient optimisés en fonction des besoins et de la spécificité de l'outil de production.
- L'application a montré comment un nombre croissant de composants en séries diminue la fiabilité du système, alors qu'un nombre décroissant de composants en parallèle et en redondance contribue à l'augmentation de la fiabilité des systèmes. Notre contribution s'inscrit dans cette logique afin d'améliorer la disponibilité des différents systèmes de productions.

REFERENCES

- [1] Barger P. Evaluation et Validation de La Fiabilité et de la disponibilité des Systèmes D'Automatisation à Intelligence Distribuée, en Phase Dynamique. Thèse de Doctorat de l'UHP Nancy 1, France, 2003
- [2] P. Lyonnet . Ingénierie de la Fiabilité. Edition Tec et Doc, Lavoisier, Paris 2006.
- [3] H. Langseth, L. Portinale, Bayesian networks in reliability, Reliability Engineering and System Safety 92 (2007) 92–108
- [4] XieM, Lai, CD. On the increase of the expected lifetime by parallel redundancy. Asia-Pac J Oper Res 1996;13:171–9.
- [5] Guangbin Yang, Life Cycle Reliability Engineering. 2007 John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 978-0-471-71529-0
- [6] Michael T. Todinov, Risk-Based Reliability Analysis and Generic Principles for Risk Reduction, 2006 Elsevier Science & Technology Books .ISBN: 0080447287
- [7] Dragan Komljenovic, Structure de système et redondance, Cours Ecole de Technologie Supérieure, Université de Québec
- [8] Toshio Nakagawa, Advanced Reliability Models and Maintenance Policies, (Springer series in reliability engineering) 2008 Springer, London Limited ISBN-13: 9781848002937
- [9] Olivier Basile. Modélisation de la fiabilité des équipements mécaniques. Travail de fin d'études, Faculté Polytechnique de Mons, 2001.
- [10] P. Chapouille. Fiabilité. Maintenabilité. Techniques de l'ingénieur, 6 : T4300-T4305, 1980.