

Sur les modèles de maintenance : synthèse et classification

Radouane LAGGOUNE

Laboratoire de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes LAMOS
Université de Béjaïa 06000, Algérie.
email : r_laggoun@yahoo.fr

Résumé L'importance croissante de la maintenance a généré un intérêt sans cesse croissant dans le développement et la mise en œuvre de stratégies de maintenance pour l'amélioration de la fiabilité des systèmes, la prévention de défaillances et la réduction des coûts de maintenance. Nous donnons dans ce travail une synthèse des différentes politiques de maintenance trouvées dans la littérature, ainsi que leurs modèles mathématiques basés essentiellement sur la théorie de renouvellement. Nous distinguerons entre les politiques pour systèmes mono-composants et celles pour les systèmes multi-composants.

Mots clés : politique de maintenance, système mono-composant, système multi-composant, synthèse

9.1 Introduction

Les équipements de production et de services constituent une part importante du capital de la majorité des industries. Ces équipements sont généralement sujets à des dégradations avec l'utilisation et le temps. Pour certains de ces systèmes, tels que les avions, les systèmes nucléaires, les installations pétrolières et chimiques, il est extrêmement important de tout mettre en œuvre pour éviter la défaillance en fonctionnement car elle peut être dangereuse. Par ailleurs, pour les unités à fonctionnement continu tel que les raffineries de pétrole, le manque à gagner est élevé en cas d'arrêt. Par conséquent, la maintenance devient une nécessité pour améliorer la fiabilité. L'importance croissante de la maintenance a généré un intérêt sans cesse croissant dans le développement et la mise en œuvre de stratégies de maintenance pour l'amélioration de la fiabilité des systèmes, la prévention de défaillances et la réduction des coûts de maintenance. Nous rappelons que la maintenance est toute action permettant de maintenir ou de rétablir un bien dans un état spécifié. La maintenance corrective est la maintenance effectuée après défaillance. La maintenance préventive est toute maintenance effectuée en service dans le but de réduire la probabilité d'occurrence de panne.

9.2 Politiques de maintenance pour systèmes mono-composant

Les hypothèses de base sont :

- La durée de vie du composant a un taux de défaillance croissant (IFR).
- - Il existe un nombre infini de composants identiques avec des durées de vie iid.

Politique de MP dépendant de l'âge

Dans cette politique, un composant est remplacé préventivement à l'âge T ou à la défaillance si celle-ci a lieu avant T [Barlow and Hunter 1960]. Le coût moyen par unité de temps est donné par :

$$C(T) = \frac{C_p R(T) + [1 - R(T)] C_d}{\int_0^T R(t) dt} \quad (9.1)$$

Où : Le numérateur représente le coût total du cycle et le dénominateur la longueur du cycle. T est l'âge du remplacement préventif; C_p le coût du remplacement préventif; C_d le coût de défaillance; $R(t) = 1 - F(t)$ est la fonction de fiabilité (de survie).

Depuis, plusieurs extensions ou variantes de ce modèle ont vu le jour : Tahara et Nishida (1975), Nakagawa (1984), Sheu et al (1993), Sheu et al (1995), Block et al (1993), Wang and Pham (1999).

Politique de maintenance préventive périodique

Dans cette politique un élément est préventivement maintenu à des intervalles de temps fixes kT ($k = 1, 2, 3, \dots$) indépendants de l'historique des pannes, et réparé à la défaillance. Une autre politique de MP périodique de base est "le remplacement périodique avec réparation minimale à la défaillance" où un élément est remplacé à des temps prédéterminés kT ($k = 1, 2, \dots$) et les défaillances sont éliminées par des réparations minimales (Barlow and Hunter 1960).

$$C(T) = \frac{(C_d + C_p)E(N(t)) + C_p}{T} \quad (9.2)$$

Où le nombre moyen de remplacements de 0 à T est donné par $E(N(t))$ au coût $(C_p + C_d)$, où : C_p est le coût de la pièce, C_d le coût entraîné par la défaillance.

Avec les concepts de réparation minimale et surtout de maintenance imparfaite (Pham and Wang 1996), différentes extensions et variantes de ces deux politiques ont été proposées : Liu et al (1995), Berg et Epstein (1976), Tango (1978), Nakagawa (1981a,b), Wang and Pham (1999).

9.3 Politique de la limite de défaillance

Sous cette politique, la maintenance préventive a lieu seulement lorsque le taux de défaillance ou autres indices de fiabilité atteignent un niveau prédéterminé et les défaillances sont corrigées par des réparations.

Politique de maintenance préventive séquentielle

Sous cette politique, un élément est préventivement maintenu à des intervalles de temps inégaux. Souvent les intervalles deviennent de plus en plus courts avec le temps, sachant que la majorité des éléments nécessitent des maintenances plus fréquentes avec l'âge.

Politique de la limite de réparation

Lorsque un élément tombe en panne, le coût de réparation est estimé et la réparation est entreprise si le coût estimé est inférieur à une limite prédéterminée ; sinon l'élément est remplacé, cette politique est connue sous le nom de "la limite du coût de réparation".

9.4 Politiques de maintenance pour systèmes multi-composants

Dans le cas où il n'y a aucune dépendance économique ou structurelle et les défaillances sont indépendantes, les politiques précédentes restent valables pour un système multi-composant, en considérant chaque sous-système séparément. Cependant, dans la pratique il existe souvent des dépendances entre les sous systèmes, par conséquent une politique optimale pour chaque sous-système pris à part n'est pas forcément optimale pour le système. La dépendance économique, Les défaillances dépendantes, La dépendance structurelle.

9.4.1 Politique de maintenance en groupe (Group maintenance policy)

Les politiques de maintenance en groupe peuvent être divisées en trois classes. La première classe concerne la détermination des éléments pouvant être remplacés quand une défaillance a lieu. Ceci est particulièrement intéressant lorsque les coûts d'accessibilité associés au montage et démontage sont variables, et des maintenances préventives simultanées sur certaines catégories de composants sont appropriées. La seconde classe concerne la réduction des coûts en prévoyant des éléments redondants dans la conception des systèmes. La troisième classe concerne les systèmes constitués de machines fonctionnant indépendamment, sujettes à des défaillances aléatoires et ayant les mêmes distributions.

- Gertsbakh (1984), Vergin and Scriabin (1977), Love et al (1982), Sheu et Jhang (1997), Assaf et Shanthikumar (1987), Wildeman et al (1997). Nous donnerons comme exemple les modèles proposés par D. Assaf et G. Shanthikumar (1987)

Considérons un système composé de N machines identiques sujettes à des défaillances aléatoires et les temps à la défaillance sont indépendants ayant la même distribution exponentielle de paramètre λ connu ($j, 0$). Soient :

C_0 : coût initial de réparation (ex. le coût de mise à disposition de la logistique nécessaire) ;

C_1 : coût de réparation par machine ;

C_2 : coût engendré par l'arrêt d'une machine (en terme de perte de production). Ainsi :

- Le coût de réparation de $n \geq 1$ machines est : $C_0 + nC_1$;

- Le coût engendré par l'arrêt de n machines durant un intervalle de temps h est : nhC_2 .

Modèle 1 : Cas d'une inspection continue

Le nombre de machines défaillantes est connu à chaque instant.

$$C_1(n, m) = \frac{\lambda C_0 + m\lambda C_1 + \left(\sum_{k=0}^{m-1} \frac{n-m+k}{N-n+m-k}\right) C_2}{\sum_{k=0}^{m-1} \frac{1}{N-n+m-k}} \quad (9.3)$$

Modèle 2 : Cas d'une inspection périodique

Le nombre de machines défaillantes n'est pas connu. L'information peut être obtenue en payant un coût d'inspection noté (exemple : le coût d'arrêt de production durant l'inspection).

$$\begin{aligned} C_2(t) &= \frac{C_0^I + C_0(1 - e^{N\lambda t}) + N(C_1 - \frac{C_2}{\lambda})(1 - e^{-\lambda t})}{t} + NC_2. \\ C_2(0) &= NC_2 \end{aligned} \quad (9.4)$$

9.4.2 Politiques de maintenance opportuniste (Opportunistic maintenance policies)

Comme il a été mentionné précédemment, les dépendances dans les systèmes multi-composants, notamment la dépendance économique, font qu'il est profitable d'effectuer de la maintenance préventive sur un élément non défaillant au moment où la réparation de l'élément défaillant a commencé. Berg (1976), Berg (1978), Zheng et Fard (1991), Murthy et al. (1993), Dagpunar (1996), Pham et Wang (2000), Wang et al (2001). Nous allons présenter comme exemple le modèle de Murthy et al. (1993) :

Modèle 1 : Défaillance induite

Le modèle de coût est donné par :

$$C_1(N) = \frac{C_{d_1} \sum_{j=1}^{N-1} A_j + C_{p_3} - (C_{p_3} - C_{p_2})A_{N-1}}{\sum_{j=0}^{N-1} A_j \int_0^\infty P_j(t) dt}, \tag{9.5}$$

$$A_j = (1 - \alpha_1) \dots (1 - \alpha_j); (j = 1, 2, \dots); A_0 = 0,$$

$$P_j(t) = \frac{\left[\int_0^t \lambda(u) du \right]^j}{j!} e^{-\int_0^t \lambda(u) du}; j = 0, 1, 2, \dots \tag{9.6}$$

C_{d_1} : le coût d'une défaillance de l'unité 1 ;

C_{p_2} : le coût de remplacement à la $N^{\text{ème}}$ défaillance de l'unité 1 ;

C_{p_3} : le coût de remplacement à la défaillance de l'unité 2 ($C_{p_3} \geq C_{p_2}$).

9.4.3 Optimisation du plan de maintenance d'un système multi composant

La politique de maintenance proposée est basée sur la politique de remplacement selon l'âge pour un système mono-composant adaptée au système multi-composant. Elle prend en compte les dépendances existant entre les différents composants, notamment la dépendance économique comme signalé précédemment. Dans cette politique, chaque composant est remplacé après défaillance ou quand il atteint un âge optimal T et lors d'un remplacement correctif d'un composant i, l'opportunité est saisie pour anticiper le remplacement d'autres composants j. L'expression du coût total par unité de temps est donnée par :

$$C_T(t) = \frac{\left(C_0^c + C_i^c + \sum_{j=1}^{n_h} C_j^P \right) F_{sys}(t) + \left(C_0^P + \sum_{r=1}^{n_p} C_r^P \right) R_{sys}(t)}{\int_0^t R_{sys}(u) du} \tag{9.7}$$

Où l'indice i indique le composant qui tombe en panne en premier : $T_i = \min_{j=1, \dots, n} T_j$. La politique opportuniste introduite ici consiste à grouper des remplacements afin de ne pas pénaliser la disponibilité totale du système, ce regroupement est obtenu en réarrangeant les temps optimums de remplacement par : $t_i = k_i \tau$ où k_i un nombre entier, $\tau = \min_{j=1, \dots, n} t_j$ (voir figure 2). L'expression du coût total deviendra :

$$C_T(\tau, k_1, k_2, \dots, k_n) = \frac{\sum_{\alpha=1}^{k_{max}} \sum_{i=1}^n \left(C_0^c + C_i^c + \sum_{j=1}^{n_h} C_j^P \right) F_{sys,i}(t_\alpha) + \left(C_0^P + \sum_{r=1}^{n_p} C_r^P \right) R_{sys}(t_\alpha)}{\int_0^{k_{max}\tau} R_{sys}(u) du} \tag{9.8}$$

Où $F_{sys,i}(\cdot)$ représente la probabilité de défaillance du système due au composant i.

L'optimisation consiste à déterminer les temps de remplacement t_i qui minimiseraient le coût total par unité de temps

9.4.4 Conclusion

Une multitude de politiques de maintenance est donnée dans la littérature spécialisée. Plus les modèles proposés se rapprochent de la réalité, plus leur formalisme devient compliqué. D'un autre côté la résolution (l'optimisation) devient également très difficile, c'est pour cela qu'on a souvent recours à des hypothèses simplificatrices. Un intérêt particulier doit être accordé pour utiliser des hypothèses les plus réalistes possible et consentir à fournir plus d'efforts dans la construction de stratégies de résolution.

Références

1. A.W. Bowman, Assaf, D., Shanthikumar G.J., 1987. Optimal group maintenance policies with continuous and periodic inspections. *Management Science*, 33, 1440-1452.
2. Barlow, R.E., Hunter, L.C., 1960. Optimum preventive maintenance policies. *Operation Research*, 8, 90-100.
3. Berg, M., 1976. Optimal replacement policies for two-unit machines with increasing running costs. *Stochastic Processes and Applications*, 5, 89-106.
4. Dekker, R. Wildman, R.E., Van Der Duyn Schouten, F.A., 1997. A review of multi-component maintenance models with economic dependence. *Mathematical Methods of Operational Research*, 45/3, 411-435.
5. Kijima, M., Nakagawa, T., 1992. Replacement policies of a shock model with imperfect preventive maintenance. *European Journal of Operations Research*, 57, 100-110.
6. Tahara, A., Nishida, T., 1975. Optimal replacement policy for minimal repair model. *Journal of Operations Research Society of Japan*, 18, 113-124.
7. Wang H., 2002. A survey of maintenance policies of deteriorating systems. *European Journal of Operational Research*, 139, 469-489.