Optimisation de la maintenance sélective pour un système multi-composants opérant des missions de durées aléatoires et sujet à des actions de maintenance imparfaite

I. Djelloul[1,2] , A. Khatab[2]
Université de Tlemcen[1] / Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz [2]
MELT / LGIPM
Tlemcen, Algérie/ Metz, France
djelloul.imene@yahoo.fr, khatab@enim.fr

E.H Aghezzaf[3], Z. Sari[4]
Université de Ghent[3] / Université d'Izmir[4]
Department of Industrial Systems Engineering and Product Design/
Department of Industrial Engineering
Ghent, Belgique / Izmir, Turkey
ElHoussaine.Aghezzaf@UGent.be, z_sari@mail.univ-tlemcen.dz

***Résumé*— Ce papier présente une stratégie de maintenance sélective pour un système multi-composants requis pour effectuer une série de missions avec des arrêts finis planifiés entre deux missions successives. Pendant ces arrêts, les actions de maintenance peuvent être réalisées sur certains composants du système. Pour chaque composant, une liste d'actions de maintenance est disponible où figurent les actions de maintenance parfaite, minimale ou imparfaite. Tenant compte des limitations sur les ressources en maintenance telles que le temps et le budget, il est parfois impossible d'effectuer toutes les opérations de maintenance désirées. Le problème de la maintenance sélective vise donc à sélectionner les composants qui doivent être maintenus afin de maximiser la fiabilité du système pour exécuter la prochaine mission. Dans ce travail, les durées des missions sont considérées aléatoires et représentées par des variables aléatoires. Un modèle d'optimisation mathématique de la maintenance sélective est ensuite proposé et dont l'objectif est de maximiser la fiabilité du système à exécuter sa prochaine mission, en tenant compte des contraintes de budget et du temps alloués à la maintenance. L'intérêt de notre approche est démontré sur un exemple de système séries-parallèle.**

Mots clés—Maintenance sélective; Fiabilité; Optimisation.

I. INTRODUCTION

Dans plusieurs environnements industriels, les systèmes de production de biens et de services doivent assurer plusieurs missions avec des arrêts finis programmés entre deux missions successives. Durant ces arrêts, il est parfois nécessaire de réaliser des opérations de maintenance sur les composants du système afin d'améliorer les performances en terme de probabilité du système à exécuter la prochaine mission. Cependant, à cause des limitations sur les ressources en maintenance telles que le temps et le budget, il est souvent impossible d'effectuer toutes les actions de maintenance désirées. Dans ce contexte, le problème de la maintenance sélective vise à sélectionner un sous-ensemble des actions de maintenance à effectuer sur certains composants, en tenant compte des contraintes imposées par les ressources en maintenance.

Xème Conférence Internationale : Conception et Production Intégrées, CPI 2015, 2-4 Décembre 2015, Tanger - Maroc.

Xth International Conference on Integrated Design and Production, CPI 2015, December 2-4, 2015, Tangier - Morocco.

Parmi les premiers travaux, on peut citer ceux de Rice et al. [1] qui ont établi un modèle de programmation mathématique afin d'optimiser le problème de la maintenance sélective pour un système série-parallèle avec des composants identiques sur chaque étage du système. Cassady et al. [2] ont étendu le modèle de [1] en proposant des méthodes améliorées pour résoudre le modèle d'optimisation de la maintenance sélective initialement établi dans [1]. D'autres extensions ont été proposées dans [3] où les auteurs considèrent que les composants du système ont des durées de vie distribuées selon une loi de Weibull. Ce travail propose également d'autres options de maintenance comme: réparations minimales, remplacement correctif et le remplacement préventif. Pandey et al. [4] ont étudié le problème de la maintenance sélective pour les systèmes binaires en considérant les actions de maintenance imparfaite. Le travail développé par [4] est similaire à celui proposé dans [5] ; les paramètres de la maintenance imparfaite utilisés dans [4] sont évalués en fonction des coûts de remplacement correctif et préventif ainsi que les coûts de réparation minimale. Maillart et al. [6] ont considéré l'optimisation de la maintenance sélective pour des systèmes binaires selon une structure série-parallèle avec des missions multiples de durées identiques.

Pour traiter la maintenance sélective dans le cas de système de grande taille, deux heuristiques sont proposées dans [7]. Dans un autre travail, Khatab et al. [8] ont proposé un algorithme de recuit simulé pour résoudre le problème de la maintenance sélective pour des systèmes séries-parallèle. De même, Lust et al. [9] ont proposé une méthode exacte basée sur la procédure de Branch and Bound, en plus d'un algorithme basé sur la recherche tabou. Dans [10], les auteurs ont abordé le problème de la maintenance sélective pour les systèmes avec dépendance stochastiques entre les composants du système.

Les travaux, ci-haut mentionnés, supposent que les durées des missions sont parfaitement connues et constantes. Cependant, cette hypothèse ne peut être valide dans de nombreuses situations réelles où il est effectivement difficile d'évaluer précisément la durée d'une mission. Cette durée peut être affectée par l'occurrence d'événements aléatoires qui conduisent le système soit à abandonner la mission ou, au mieux, de continuer à fonctionner, mais avec plus de temps supplémentaire. En conséquence, il est plus pratique de considérer que les durées de mission ne sont pas précisément connues, mais plutôt aléatoires et caractérisées par des distributions de probabilité appropriées.

Dans le présent travail, nous considérons un système multi-composant dont la structure, sans perte de généralité, est une structure série-parallèle. Chaque composant peut être maintenu selon une liste d'actions de maintenance. Chaque action de maintenance est caractérisée par un niveau d'amélioration de la fiabilité du composant.

La prochaine mission, d'une durée aléatoire, sera exécutée par le système mais avec un niveau de fiabilité exigé. En raison des ressources limitées en maintenance, tous les composants ne peuvent cependant être maintenus pendant l'arrêt du système. Le problème de la maintenance sélective consiste donc, d'abord à sélectionner un sous-ensemble de composants à maintenir, puis ensuite de choisir le degré d'amélioration de la fiabilité à appliquer. Dans ce travail, la stratégie de la maintenance sélective proposée consiste à maximiser la fiabilité du système pour accomplir la prochaine mission en tenant compte du coût et de temps limité de chaque arrêt. Le modèle d'optimisation proposé est un modèle non-linéaire et stochastique. Afin d'illustrer notre approche, un exemple numérique est étudié et discuté. Les résultats obtenus permettront de montrer l'intérêt à considérer les durées des missions comme stochastiques et modélisées par des variables aléatoires de distributions appropriées.

Le reste de ce papier est organisé comme suit. La seconde section décrit le système étudié. Section 3, les actions de maintenance disponibles et leurs coûts et temps. Dans la section 4, le problème de la maintenance sélective est formulé et le modèle correspondant est alors développé en tenant compte de l'incertitude dans la durée de la prochaine mission. Un exemple numérique est donné à la section 5 pour illustration.

II. Description Du Systeme Et Calcul De Fiabilite

Considérons un système, avec une structure série-parallèle, composé de n sous-systèmes en série $S_i(i = 1, \dots, n)$. Chaque sous-système S_i est composé de N_i composants en parallèle $C_{ij}(j = 1, \cdots, N_i)$. Dans ce travail, on suppose que les composants ainsi que le système sont binaires. En d'autres termes un composant, comme le système, ne peut avoir que deux états possibles, soit il fonctionne soit il est défaillant. Ainsi, l'état d'un composant C_{ij} est représenté par deux variables d'état $X_{ij}(m)$ et $Y_{ij}(m)$ telles que :

$$X_{ij}(m+1) = \begin{cases} 1, & si\ C_{ij}\ fonctionne\ au\ début\ de\ la\ mission\ m+1 \\ 0, & sinon \end{cases} \quad (1)$$

$$Y_{ij}(m) = \begin{cases} 1, & si\ C_{ij}\ fonctionne\ à\ la\ fin\ de\ la\ mission\ m \\ 0, & sinon. \end{cases} \quad (2)$$

Notons par $A_{ij}(m)$ et $B_{ij}(m)$ respectivement l'âge du composant C_{ij} au début et à la fin de la mission m. De plus, la durée de la prochaine mission $(m+1)$ est modélisée par une variable aléatoire U dont la densité de probabilité est $f_U(u)$ et la fonction de distribution est $F_U(u)$. Celles-ci sont définies sur le support de U représenté par l'intervalle $[Umin, Umax]$. Par conséquent, la probabilité que le composant C_{ij} accomplisse avec succès la prochaine mission est donnée par la fiabilité conditionnelle $R_{ij}^c(m+1)$ comme suit :

$$R_{ij}^c(m+1) = Pr\left(T_{ij} > U + A_{ij}(m+1) | T_{ij} > A_{ij}(m+1)\right) X_{ij}(m+1), \quad (3)$$

où T_{ij} représente la variable aléatoire des durées de vie du composant C_{ij}. En utilisant quelques opérations algébriques de base, l'équation (3) devient:

$$R_{ij}^c(m+1) = \frac{\int_{umin}^{umax} R_{ij}\left(u + A_{ij}(m+1)\right) f_U(u) du}{R_{ij}\left(A_{ij}(m+1)\right)} . X_{ij}(m+1), \quad (4)$$

où $R_{ij}(t)$ est la fiabilité inconditionnelle du composant C_{ij}. La probabilité $R^c(m+1)$ que le système accomplisse sa prochaine mission est alors :

$$R^c(m+1) = \prod_{i=1}^{n} \left(1 - \prod_{j=1}^{N_i} \left(1 - R_{ij}^c(m+1)\right)\right) \quad (5)$$

III. Actions De Maintenance Avec Leurs Couts Et Temps De Maintenance

Chaque composant C_{ij} admet une liste d'actions de maintenance L_{ij} où chaque action $l_{ij} \in \{1, \dots, L_{ij}\}$ est caractérisée par son coefficient de réduction d'âge $\alpha_{ij}(l_{ij})$. La première action de maintenance $l_{ij} = 1$ correspond à une réparation minimale. Cette action de maintenance ne doit être réalisée que si le composant C_{ij} est en état défaillant. Pour ce cas particulier, le coefficient de réduction d'âge $\alpha_{ij}(1) = 1$. L'action de maintenance $l_{ij} = L_{ij}$ permet de rendre le système dans un état comme neuf (*as good as New*), c'est-à-dire que son coefficient de réduction d'âge $\alpha_{ij}(L_{ij}) = 0$. Les autres actions de maintenance dans le cas intermédiaire $1 < l_{ij} < L_{ij}$ correspondent à des actions de maintenance imparfaite. Ces dernières consistent à remettre l'état de santé du système entre les deux cas extrêmes : l'état neuf, obtenu après une action de maintenance de niveau L_{ij}, et l'état juste avant défaillance obtenu après une réparation minimale suite à une défaillance. Par conséquent, si une action de maintenance de niveau l_{ij} est effectuée sur le composant C_{ij} à la fin de la mission m, alors l'âge $B_{ij}(m)$ du composant est réduit à $\alpha_{ij}(l_{ij}) \times B_{ij}(m)$. De ce fait, l'âge $A_{ij}(m+1)$ du composant C_{ij} au début de la mission $m+1$ est $A_{ij}(m+1) = \alpha_{ij}(l_{ij}) \times B_{ij}(m)$. Pour prendre en considération le cas où aucune action de maintenance n'est réalisée sur le composant C_{ij}, la liste des actions de maintenance disponibles est augmentée de la valeur 0, ce qui correspond à "Ne rien faire" sur C_{ij} à la fin de la mission m.

Le coût induit par une action de maintenance de niveau l_{ij} lorsque celle-ci est effectuée sur le composant C_{ij} à la fin de la mission m est défini comme suit:

$$C(l_{ij}) = \begin{cases} C_{ij}^{w,0} + C^{w}(l_{ij}) \; si \;\; Y_{ij}(m) = 1, \\ C_{ij}^{F,0} + C^{F}(l_{ij}) \; si \;\; Y_{ij}(m) = 0, \end{cases} \tag{6}$$

où $C_{ij}^{(w,0)}$ et $C^{w}(l_{ij})$ sont, respectivement, les coûts fixes et les coûts variables induits par l'action de maintenance de niveau l_{ij} lorsqu'elle est effectuée sur C_{ij} en état de fonctionnement. Les coûts $C_{ij}^{(F,0)}$ et $C^{F}(l_{ij})$ sont les coûts fixes et les coûts variables induits lorsque C_{ij} est défaillant et subit à une action de maintenance l_{ij}.

Dans ce qui suit, le coût variable $C^{F}(l_{ij})$ d'une réparation minimale$(l_{ij} = 1)$ dans le cas du composant défaillant est noté par C_{ij}^{MR}, tandis que les coûts variables $C^{W}(l_{ij})$ et $C^{F}(l_{ij})$ des deux remplacements correctifs et préventifs $(l_{ij} = L_{ij})$ sont notés respectivement par $C_{ij}^{(W,R)}$ et $C_{ij}^{(F,R)}$. Dans ce travail, le coefficient de réduction d'âge $\alpha_{ij}(l_{ij})$ d'une action de maintenance de degré l_{ij} est exprimé en fonction de l'état de fonctionnement du composant C_{ij} et sa durée de vie résiduelle [4] :

$$\alpha_{ij}(l_{ij}) = \begin{cases} 1 - \left(\dfrac{C^{W}(l_{ij})}{C_{ij}^{W,R}}\right)^{\delta(B_{ij}(m))}, & Si \; Y_{ij}(m) = 1, \\ 1 - \left(\dfrac{C^{F}(l_{ij})}{C_{lij}^{F,R}}\right)^{\delta(B_{ij}(m))}, & Si \; Y_{ij}(m) = 0, \end{cases} \tag{7}$$

Où le coefficient $\delta(B_{ij}(m))$ est évalué tel que :

$$\delta(B_{ij}(m)) = \frac{B_{ij}(m)}{MRL} = \frac{B_{ij}(m) \times R_{ij}(B_{ij}(m))}{\int_{B_{ij}(m)}^{\infty} R_{ij}(t)\, dt} \tag{8}$$

Dans l'équation (8), le terme MRL représente la durée de vie résiduelle moyenne du composant C_{ij} . Elle peut être obtenue comme suit. Soit T_{ij} le temps de défaillance du composant C_{ij}. Supposons que le composant a survécu jusqu'à l'âge effectif $B_{ij}(m)$. Il en résulte que la variable aléatoire $T_{ij} - B_{ij}(m)$ (défini lorsque $T_{ij} > B_{ij}(m)$) représente la durée de vie résiduelle du composant C_{ij}. La durée de vie résiduelle moyenne est donnée alors par :

$$MRL = E\big(T_{ij} - B_{ij}(m) \big| T_{ij} > B_{ij}(m)\big) = \frac{\int_{B_{ij}(m)}^{\infty} R_{ij}(t)\, dt}{B_{ij}(m)} \tag{9}$$

IV. Modele D'optimisation De La Maintenance Selective

Dans le présent papier, l'objectif de la maintenance sélective est de maximiser la fiabilité du système $R^{c}(m+1)$ pour accomplir la prochaine mission dont la durée est aléatoire. Pour tenir compte des contraintes budgétaires et temporelles de maintenance, l'évaluation du coût total obtenu par les actions de maintenance ainsi que le temps total correspondant sont nécessaires. A l'instar du travail proposé dans [5], nous considérons deux variables de décision $W_{ij}(l_{ij})$ et $F_{ij}(l_{ij})$:

$$W_{ij}(l_{ij}) = \begin{cases} 1, si \; Y_{ij}(m) = 1 \; et \; MP \; de \; niveau \; l_{ij} \; est \; réalisée \; sur \; C_{ij} \\ 0, sinon, \end{cases} \tag{10}$$

$$F_{ij}(l_{ij}) = \begin{cases} 1, si \; Y_{ij}(m) = 0 \; et \; MC \; de \; niveau \; lij \; est \; réalisée \; sur \; C_{ij} \\ 0, sinon. \end{cases} \tag{11}$$

Notons par $C_p(m)$ et $C_c(m)$ les coûts totaux induits respectivement par les actions de maintenance préventives et correctives effectuées pendant l'arrêt du système . Ces coûts sont évalués comme suit:

$$C_p(m) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k=2}^{L_{ij}} C_{ij}^{w}(k) W_{ij}(k) Y_{ij}(m) \tag{12}$$

$$C_c(m) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k=1}^{L_{ij}} C_{ij}^{F}(k) F_{ij}(k) \left(1 - Y_{ij}(m)\right) \tag{13}$$

Le coût total de la maintenance $C_t(m)$ est obtenu par la somme des coûts résultants des actions de maintenance corrective et préventive :

$$C_t(m) = C_p(m) + C_c(m) \tag{14}$$

De la même manière, les temps totaux requis pour réaliser les actions de maintenance préventives et correctives sont notés, respectivement, par $T_p(m)$ et $T_c(m)$, tels que :

$$T_p(m) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k=2}^{L_{ij}} T_{ij}^{w}(k) W_{ij}(k) Y_{ij}(m) \tag{15}$$

$$T_c(m) = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k=1}^{L_{ij}} T_{ij}^F(k) F_{ij}(k) \left(1 - Y_{ij}(m)\right) \quad (16)$$

À partir des équations (14) et (15), le temps total requis pour toutes les actions de maintenance confondues est :

$$T_t(m) = T_p(m) + T_c(m) \quad (17)$$

Supposons que le budget de maintenance est C_0, et la durée de l'arrêt programmé est T_0. Il en résulte que le modèle de programmation non linéaire correspondant à maximiser la probabilité d'accomplir la prochaine mission est donné par:

$$Maximiser\ R^c(m+1) = \prod_{i=1}^{n} \left(1 - \prod_{j=1}^{N_i} \left(1 - R_{ij}^c(m+1)\right)\right) \quad (18)$$

Sujet à :

$$C_t \leq C_0 \quad (19)$$

$$T_t \leq T_0 \quad (20)$$

$$W_{ij}(m) + F_{ij}(m) \leq 1 \quad (21)$$

$$F_{ij}(m) + Y_{ij}(m) \leq 1 \quad (22)$$

$$W_{ij}(m) - Y_{ij}(m) \leq 0 \quad (23)$$

$$A_{ij}(m+1) = \alpha_{ij}(k) \times B_{ij}(m) \quad (24)$$

$$X_{ij}(m+1) = \begin{cases} Y_{ij}(m) + F_{ij}(k) \ if\ Y_{ij}(m) = 0, \\ Y_{ij}(m), \qquad otherwise. \end{cases} \quad (25)$$

$$i = 1, \ldots, n; j = 1, \ldots, N_i; l_{ij} = 1, \ldots, L_{ij} \quad (26)$$

Les contraintes (19) et (20) permettent de tenir compte des limites sur les ressources disponibles pour faire la maintenance entre les missions. Les contraintes de (21) à (23) garantissent qu'un composant ne peut subir qu'une action de maintenance à la fois soit préventive, si le composant fonctionne encore, soit corrective si le composant est défaillant. La contrainte (24) permet d'actualiser l'âge du composant au début de la prochaine mission conformément au modèle de la maintenance imparfaite. La contrainte (25) permet d'actualiser l'état de fonctionnement des composants au début de la prochaine mission.

Dans la section suivante, un exemple illustratif est présenté pour montrer l'impact à considérer les durées des missions comme stochastique sur les décisions de sélection du niveau de la maintenance et l'estimation de la fiabilité du système.

V. EXEMPLE NUMERIQUE

Dans cette section, un système série-parallèle est considéré pour illustrer notre approche. Le système est composé de deux sous-systèmes en série et chaque sous-système est constitué de deux composants en parallèle et dont les données sont partiellement issues de [4]. Les durées de vie d'un composant $C_{ij}(i,j = 1, 2)$ sont distribuées selon une loi de Weibull de paramètre d'échelle η_{ij} et de paramètre de forme β_{ij}.

Le nombre d'actions de maintenance disponibles est identique à tous les composants et supposé être de 6, c'est-à-dire, $L_{ij} = 6$ pour $(i,j = 1,2)$. Les valeurs de η_{ij} et β_{ij} sont données dans le tableau (I). Le tableau (I) donne également les coûts et les temps de maintenance correspondants aux remplacements préventifs et correctifs et à la réparation minimale. Ainsi, ce tableau figure, l'âge $B_{ij}(m)$ et la variable d'état $Y_{ij}(m)$ de chaque composant C_{ij} à la fin de la mission m. On rappel que les coûts engendrés par les actions de maintenance sont constitués par les coûts de réparation minimale C_{ij}^{MR}, en plus des coûts de remplacement correctif $C_{ij}^{(F,R)}$ et préventif $C_{ij}^{(W,R)}$. Les coûts fixes de maintenance corrective et préventive sont identiques $C_{ij}^{(F,0)} = C_{ij}^{(W,0)} = 1$.
De même, les temps requis pour exécuter les actions de maintenance sont représentés par les temps de remplacement correctif $T_{ij}^{(F,R)}$ et préventif $T_{ij}^{(W,R)}$, et le temps de réparation minimale T_{ij}^{MR}. Les temps fixes de la maintenance corrective et préventive sont tels que $T_{ij}^{F,0} = T_{ij}^{W,0} = 1$. Les temps et les coûts variables correspondants aux actions de maintenance intermédiaires (1< l_{ij} < 6) sont donnés selon les formules suivantes :

$$C_{ij}^w = C_{ij}^{w,0} + \frac{l_{ij}}{L_{ij}} C_{ij}^{w,R}; \quad (27)$$

$$C_{ij}^F = C_{ij}^{F,0} + \frac{(l_{ij} - 1)}{L_{ij} - 1} C_{ij}^{F,R}; \quad (28)$$

$$T_{ij}^w = T_{ij}^{w,0} + \frac{l_{ij}}{L_{ij}} T_{ij}^{w,R};\ \text{et} \quad (29)$$

$$T_{ij}^F = T_{ij}^{F,0} + \frac{(l_{ij} - 1)}{L_{ij} - 1} T_{ij}^{F,R} \quad (30)$$

TABLE I. LES PARAMETRES DU SYSTEME, TEMPS ET COUTS DE MAINTENANCE

C_{ij}	η_{ij}	β_{ij}	$B_{ij}(m)$	$Y_{ij}(m)$	$C_{ij}^{W,R}$	$C_{ij}^{F,R}$	C_{ij}^{MR}	$T_{ij}^{W,R}$	$T_{ij}^{F,R}$	T_{ij}^{MR}
C_{11}	15	1.5	15	1	12	12	6	5	3	1
C_{12}	15	1.5	20	0	12	12	5	5	3	1
C_{21}	20	3	8	0	14	14	5	4	2	2
C_{22}	20	3	15	1	15	15	6	4	2	2

Dans le présent exemple, la durée stochastique U de la prochaine mission suit, sans perte de généralité, une distribution uniforme. Deux cas de distributions uniformes sont utilisés. Elles sont définies sur leur support respectif [2,10] et [6,10]. Par exemple, dans le premier cas où la durée de la mission est uniformément distribuée sur l'intervalle [2,10], cela signifie que le système est mis en œuvre pour exécuter une mission dont la durée est comprise entre 2 et 10 unités de temps et, en moyenne, sa durée est de 6 unités de temps ($E(U) = 6$).

Dans la suite de cette section, nous comparons et analysons les résultats du problème d'optimisation obtenus en utilisant les valeurs moyennes des durées des missions, et ceux obtenus en utilisant les distributions complètes de ces durées. À cet effet, On suppose que la durée de l'arrêt T_0 entre les deux missions est $T_0 = 9$ et que le budget C_0 en maintenance est limité à 25 ($C_0 = 25$). Supposons également que l'agent décideur en maintenance adopte un plan de maintenance sélective selon lequel les composants C_{12} et C_{21} sont sélectionnés pour des actions de maintenance à la fin de la mission m. Les niveaux de maintenance 3 et 6 sont supposées être sélectionnés pour être exécutées sur les composants C_{12} et C_{21}, respectivement. Ainsi, une action de maintenance imparfaite est effectuée sur le composant C_{12} qui réduit son âge de 20 à 17.1048, tandis que le composant C_{21} est remplacé et devient comme neuf (son âge est réduit à 0). Il est aussi intéressant de remarquer que le temps total et le coût consommé par ce plan de maintenance sont les mêmes dans les deux cas stochastique et déterministe. Ils sont respectivement évalués à $T_t(m) = 5.2$ et $C_t(m) = 20.8$. Les valeurs de la fiabilité des composants du système en termes de chaque niveau de maintenance sont données dans le tableau (II) pour les durées de missions aléatoires (cas stochastique), et dans le tableau III pour les durées moyennes de missions (cas déterministe).

TABLE II. EVALUATION DE LA FIABILITE : CAS DES DUREES DE LA MISSION ALEATORES

C_{ij}	$R^c_{ij}(m+1)$ $U \sim \mathcal{U}\,(2{,}10)$	$R^c_{ij}(m+1)$ $U \sim \mathcal{U}\,(6{,}10)$
C_{11}	53,407%	41.05%
C_{12}	51,65%	39.13%
C_{21}	96,24%	93.46%
C_{22}	49,34%	33.81%
	$R^c(m+1) =$ 75,99%	$R^c(m+1) = 61.35\%$

TABLE III. EVALUATION DE LA FIABILITE : CAS DES DUREES DE LA MISSION DETERMINISTES

C_{ij}	$R^c_{ij}(m+1)$ $E(U) = 6$	$R^c_{ij}(m+1)$ $E(U) = 8$
C_{11}	51.87%	40.71%
C_{12}	49.96%	38.77%
C_{21}	97.34%	93.80%
C_{22}	47.91%	33.32%
	$R^c(m+1) =$ 74.86%	$R^c(m+1) = 61.06\%$

Le Tableau III montre que le plan de maintenance adopté fournit une fiabilité du système de 74.86% et 61.06% lorsque les durées des missions sont respectivement égales à 6 et 8 unités de temps. Cependant, si on considère que les durées des missions sont aléatoires, le même plan de maintenance fournit une fiabilité du système pour exécuter la prochaine mission évaluée à 75.99% et 61.35%, respectivement, lorsque les durées sont distribuées selon une loi uniforme sur les deux supports [2,10] et [6,10].

D'après ces résultats, lorsque la durée de la mission est supposée être déterministe, la fiabilité du système qui en résulte est sous-estimée. Cette sous-estimation peut solliciter des activités de maintenance supplémentaires pour améliorer d'avantage le niveau de la fiabilité du système requise pour exécuter la prochaine mission. En réalité ces actions ne sont pas nécessaires et engendre par conséquent une perte d'investissement en coût et en temps. Par conséquent, il est plus réaliste de considérer que les durées des missions sont aléatoires et devraient alors être modélisées par des distributions de probabilité appropriées.

VI. CONCLUSION

Dans ce papier, nous avons étudié la maintenance sélective pour les systèmes série-parallèle en tenant compte de l'incertitude dans les durées des missions. Ces durées sont alors modélisées par des variables aléatoires ayant des distributions de probabilité appropriées. A la fin de chaque mission, afin d'améliorer la fiabilité du système pour accomplir la prochaine mission, chaque composant du système peut recevoir une action de maintenance choisie parmi une liste d'actions de maintenance disponibles. Un modèle d'optimisation mathématique est ensuite appliqué sur un système multi-composant ayant une structure série-parallèle. Les résultats obtenus selon l'hypothèse que la durée de la mission est déterministe sont comparés à ceux obtenus lorsque la durée de la mission est considérée stochastique. Ces résultats montrent que la fiabilité globale du système peut être sous-estimée dans le cas déterministe. Une telle sous-estimation peut engendrer un surplus de coût de maintenance inutile. Par conséquent, il est plus réaliste de considérer que les durées des missions sont aléatoires et doivent être modélisées par des distributions de probabilité appropriées. Cela permet également une meilleure évaluation de la fiabilité du système mais aussi une gestion de maintenance sans perte et rationnelle.

REFERENCES

[1] W. F. Rice, C. R. Cassady, J. A. Nachlas, "Optimal Maintenance Plans under limited maintenance time," Proceedings of the 7th Industrial Engineering Research Conference, 1998.

[2] C.R.Cassady, E.A. Pohl, W.P. Murdock, "Selective maintenance modeling for industrial systems," Journal of Quality in Maintenance Engineering, 7(2), 2001, pp 104–117.

[3] C.R.Cassady, W.P. Murdock, E.A. Pohl, "Selective maintenance for support equipment involving multiple maintenance actions," European Journal of Operational Research, 129, 2001, pp 252–258.

[4] M. Pandey, M.J. Zuo, R. Moghaddass, M.K. Tiwari, "Selective maintenance for binary systems under imperfect repair," Reliability Engineering & System Safety, 113, 2013, pp 42-51.

[5] Y. Liu, H.Z. Huang, “Optimal selective maintenance strategy for multi-state systems under imperfect maintenance,” IEEE Transactions on Reliability, 59 (2), 2010, pp 356-367.

[6] L. M. Maillart, C.R. Cassady, C. Rainwater, K. Schneider, “Selective maintenance decision-making Over extended planning horizons,” IEEE TRANSACTIONS on Reliability, 58 (3), 2009, pp 462-469.

[7] A. Khatab, D. Ait-Kadi, M. Nourelfath, “Heuristic-based methods for solving the selective maintenance problem for series-prallel systems,” International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM), Beijing, China, 2007.

[8] A. Khatab, D. Ait-Kadi, M. Nourelfath, “Algorithme du recuit simulé pour la résolution du problème d'optimisation de la maintenance sélective des systèmes série-parallèle,” Seventh international Conference on Industrial Enginnering, Trois-Rivières, QC, Canada, 2007.

[9] T. Lust, O. Roux, F. Riane, “ Exact and heuristic methods for the selective maintenance problem,” European Journal of Operational Research, 197, 2009, pp 1166-117.

[10] G. Maaroufi, A.Chelbi, , N. Rezg, “Optimal selective renewal for systems subject to propagated failures with global effect and failure isolation phenomena,” Reliability Engineering and System Safety, 114, 2013, pp 61-70.