

# Comparaison de deux politiques de maintenance préventive pour des systèmes à dégradation.

KEOMANY BOUVARD<sup>1/2</sup>, SAMUEL ARTUS<sup>2</sup>, CHRISTOPHE BERENGUER<sup>3</sup>, VINCENT COCQUEMPOT<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire d'Automatique de Génie Informatique et Signal UMR CNRS 8146  
Polytech'Lille, 59655 Villeneuve d'Ascq, France

<sup>2</sup> Volvo Technology  
99, route de Lyon, 69800 Saint-Priest, France

<sup>3</sup> ICD/Laboratoire de Modélisation et Sécurité des Systèmes  
Université de Technologie de Troyes, 12, rue Marie Curie, 10010 Troyes, France

keomany.bouvard@volvo.com, samuel.artus@volvo.com, christophe.berenguer@utt.fr, vincent.cocquempot@univ-lille1.fr

**Résumé** — Cet article traite de l'évaluation du coût direct de maintenance pour des systèmes à dégradation graduelle. Deux stratégies de maintenance sont étudiées : la première est basée sur l'âge des composants, la seconde utilise le niveau de dégradation de ces composants. Pour la deuxième stratégie, le niveau de dégradation est modélisé en utilisant un modèle soit de type processus gamma, soit de type processus de Markov additif en tenant compte de l'influence de l'environnement extérieur et des conditions d'utilisation. Des exemples numériques illustreront le calcul du coût de maintenance et compareront les coûts minima des deux stratégies.

**Mots clés** — Coût de maintenance, modèles de dégradation, remplacement basé sur l'âge, maintenance conditionnelle

## I. INTRODUCTION

Les systèmes technologiques sont soumis à différentes contraintes qui dépendent de leur environnement opérationnel évoluant dans le temps. La dégradation d'un système croît avec l'usage et l'âge jusqu'à la panne. Par exemple, la qualité de la lubrification d'une huile moteur diminue plus rapidement avec un véhicule chantier qu'avec un véhicule autoroutier.

Les pannes des systèmes peuvent occasionner des surcoûts directs ou indirects importants : si la qualité de lubrification d'une huile moteur diminue, le moteur sera alors mal lubrifié ce qui pourrait entraîner une panne du moteur. Cette panne immobilisante engendrera des coûts de réparations, des coûts d'immobilisation, des coûts de dépannage... Le coût de maintenance d'un véhicule se décompose en un coût direct et un coût indirect. Le coût direct représente le coût de la main d'œuvre lors de la maintenance et le coût des pièces de rechange. Quant au coût indirect, il englobe les coûts de transfert véhicule – atelier, les coûts de baisse de performance et d'indisponibilité du véhicule.

La maintenance préventive a pour but de remplacer un système ou composant avant l'apparition de la panne. Plusieurs stratégies de maintenance préventive existent : dans cet article, nous allons nous intéresser plus précisément au remplacement basé sur l'âge ([3], [4], [9]) et à la maintenance conditionnelle ([6], [8], [13]). Ces deux politiques de maintenance sont couramment utilisées dans la maintenance des véhicules industriels. La maintenance conditionnelle, basée sur la

dégradation du composant est a priori plus efficace que celle basée sur l'âge. En effet, le fait de suivre l'état réel du système permet de décider des opérations adéquates de maintenance. Mais cet avantage suppose un coût supplémentaire d'inspection correspondant au nombre d'inspections effectuées et au coût individuel de chaque inspection. Le problème est donc d'estimer le coût limite d'inspection pour que la maintenance conditionnelle soit non seulement plus efficace mais aussi plus rentable que la maintenance basée sur l'âge. Pour cela, nous comparerons le coût de maintenance par unité de temps de ces deux stratégies.

L'usure d'un système ou d'un composant dépend de l'environnement opérationnel et des conditions d'utilisation. L'accumulation de la dégradation peut être modélisée en utilisant des processus stochastiques. Nous allons nous intéresser aux dégradations continues graduelles qui sont généralement modélisées par des processus gamma ([1], [13], [15]). Cependant l'usure d'un système est couramment influencée par un environnement variable ([5], [15]). L'utilisation du système change au cours du temps et l'accumulation de dégradation augmente avec l'usage. Par exemple, la topologie de la route influence en partie l'utilisation des plaquettes de freins. Dans un environnement vallonné, les plaquettes chaufferont plus souvent que sur une route plane et s'useront plus vite. Le processus additif de Markov est un outil de modélisation efficace pour ce type de dégradation. Il permet d'avoir un taux de dégradation variable en fonction de l'usage.

Le but de cet article est de comparer les coûts directs de la maintenance basée sur l'âge, c'est-à-dire basée uniquement sur la durée de vie estimée, et conditionnelle, c'est-à-dire en utilisant l'estimation de la dégradation.

Cet article est organisé de la manière suivante. Les sections II et III décrivent respectivement les modèles de dégradation et les stratégies de maintenance. La section IV compare les coûts directs des deux maintenances à partir de simulations utilisant les modèles de dégradation.

## II. MODÈLES DE DEGRADATION

Les concepts généraux sur les modèles de fiabilité sont d'abord présentés. Nous nous focaliserons ensuite sur deux modèles en particulier.

### A. Modèle de fiabilité

Meeker et Escobar [11] définissent deux approches pour construire des modèles de fiabilité:

- (i) la fiabilité basée sur la durée de vie;
- (ii) la fiabilité basée sur la dégradation.

La première méthodologie consiste à calculer la distribution de durée de vie. Ce calcul est issu du taux de panne. Singpurwalla [15] montre que le taux de panne doit se baser sur des données d'une population de composants et non d'un composant particulier.

La seconde approche développe des modèles de dégradation qui décrivent l'évolution de l'accumulation de la dégradation du système. Le temps avant l'apparition d'une panne d'un composant particulier peut alors être déterminé en fixant un seuil de dégradation maximal correspondant au seuil de panne.

### B. Propriétés des modèles de dégradation

Les modèles de dégradation sont des processus stochastiques. La construction du modèle repose sur les données disponibles de dégradation du composant. Si le composant fonctionne dans un environnement opérationnel constant, un modèle de dégradation simple suffira. Par contre, si l'environnement opérationnel est très variable, un modèle avec covariables devra être établi. Il permettra de prendre en compte l'influence des facteurs environnementaux sur la dégradation du composant.

Dans la suite, deux modèles de dégradation couramment utilisés dans le domaine de la maintenance ([6], [7], [8], [10], [13]) sont présentés.

### C. La dégradation modélisée par un processus gamma

Considérons un système ou un composant soumis à une accumulation d'usure dans le temps qui est représentée par la variable de dégradation  $Z$ . La dégradation est supposée graduelle et monotone. Abdel-Hammed [1] propose d'utiliser le processus gamma pour modéliser des dégradations qui surviennent à des instants aléatoires. Cet outil possède des propriétés mathématiques qui facilitent les calculs.

$Z(t)$ ,  $t > 0$  est un processus gamma avec le paramètre de forme  $\alpha$  et le paramètre d'échelle  $\beta$  si :

- (i)  $Z(0) = 0$ ,
- (ii)  $Z(t)$  a des incréments  $\Delta Z$  indépendants,
- (iii) Pour  $t > 0$  et  $h > 0$ ,  $Z(t+h) - Z(t)$  suit une distribution gamma :

$$f(x) = \frac{\beta^{-\alpha h}}{\Gamma(\alpha h)} x^{\alpha h - 1} e^{-x/\beta} \quad (1)$$

avec  $\Gamma$  la fonction gamma :

$$\Gamma(y) = \int_0^{\infty} z^{y-1} e^{-z} dz, \quad \forall y > 0 \quad (2)$$

Supposons  $Z$  un processus gamma et  $z_0 > 0$  un seuil de panne fixé.

Notons  $T$  le temps de panne c'est-à-dire le temps lorsque  $Z$  atteint  $z_0$ .

La fonction de répartition  $F$  du temps de panne  $T$  est [7] :

$$F(t) = P(T < t). \quad (3)$$

$$F(t) = \frac{\int_{z_0/\beta}^{+\infty} z^{\alpha-1} \exp(-z) dz}{\Gamma(\alpha)} \quad (4)$$

Grâce à la propriété de monotonie, il est possible de modéliser des processus physiques de dégradation. De plus, le processus gamma est un processus de sauts qui peut représenter l'accumulation d'un nombre infini de petits chocs.

L'indépendance et la stationnarité des incréments de ce processus signifient que la dégradation future est indépendante du niveau de dégradation actuel, elle ne dépend que de la période durant laquelle le composant sera détérioré.

Le processus gamma est approprié pour modéliser l'accumulation de dommages graduels et monotones sur une séquence de petits incréments. Van Noortwijk [13] a modélisé avec un processus gamma l'érosion des digues avec cet outil.

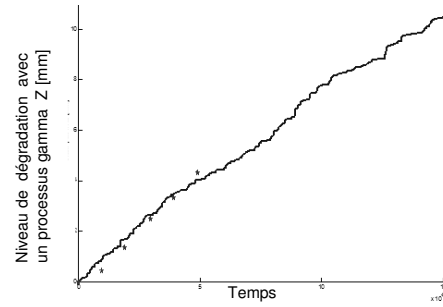


Figure 1. Exemple d'une dégradation modélisée par un processus gamma qui représente l'usure (en mm) d'une plaquette de frein d'un poids lourd. ( $\alpha=1E-3$ ,  $\beta=13$ )

### D. La dégradation modélisée par un processus additif de Markov

Considérons maintenant un système dont la dégradation dépend des conditions d'utilisation et de l'environnement opérationnel. Ces variables appelées covariables externes peuvent influencer le type et/ou la vitesse de dégradation. Çinlar [5] a décrit le processus additif de Markov pour représenter ce type de dégradation en fonction des covariables externes.

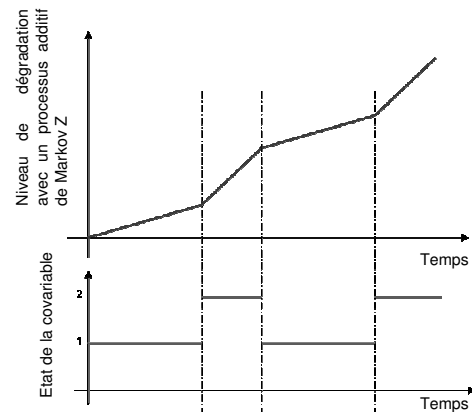


Figure 2. Exemple d'un modèle de dégradation avec un processus additif de Markov

La figure 2 montre un exemple de processus additif de Markov avec une covariable externe. Le niveau de dégradation croît en fonction de l'état de la covariable. L'accumulation de dégradation augmente plus rapidement lorsque l'état de la covariable est égal à 2.

Le processus additif de Markov est une combinaison de plusieurs processus markoviens (gamma, de Poisson, de Gauss). Dans cet article, seul le processus additif de Markov composé de processus gamma sera considéré.

Pour un système ou un composant soumis à un environnement

variable, ce modèle donne plus de précision sur l'évolution de la dégradation du système que le modèle avec le processus gamma qui ne tient pas compte des effets des facteurs environnementaux.

### III. MODÉLISATION DE LA MAINTENANCE

La partie suivante définit les coûts directs des différentes opérations de maintenance indépendamment de la politique choisie. Dans ce travail, nous ne considérerons pas les coûts indirects liés à la maintenance. Puis, deux politiques de maintenance sont présentées. La première est le remplacement basé sur l'âge du système. La deuxième est la maintenance conditionnelle qui se réfère au niveau de dégradation du système.

Ces politiques de maintenance préventives peuvent être appliquées quel que soit le modèle de dégradation. Seul le niveau de dégradation  $Z$  est nécessaire pour évaluer ces coûts de maintenance.

#### A. Coût des opérations de maintenance

Pour comparer le coût direct de maintenance des différentes politiques, nous avons besoin d'introduire des coûts d'opérations de maintenance. Ceux-ci couvrent le matériel et les coûts de la main d'œuvre :

- (i)  $C_i$  est le coût d'inspection. L'inspection consiste à vérifier l'état du système et à enregistrer le niveau de dégradation du système.
- (ii)  $C_p$ , le coût préventif. Le remplacement préventif a pour but de remettre à neuf le système avant la panne.
- (iii)  $C_c$ , le coût correctif. Le système est en panne et a besoin d'être remplacé. Le nouveau système est alors considéré comme remis à neuf.

Nous supposons que :

$$C_i < C_p < C_c \quad (5)$$

La comparaison est basée sur le coût moyen de maintenance par unité de temps. Les politiques de maintenance et le calcul du coût moyen par unité de temps pour chaque politique sont décrits ci-après.

#### B. Le remplacement basé sur l'âge

La politique de remplacement basé sur l'âge consiste à remplacer le composant ou le système ([3], [4], [9]):

- à l'âge opérationnel  $T_0$ ;
- ou lorsqu'il tombe en panne avant  $T_0$ .

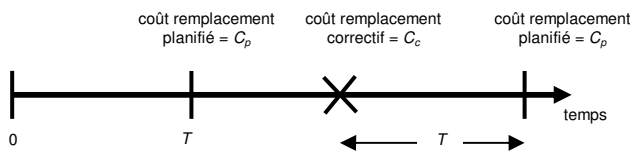


Figure 3. Politique de remplacement basé sur l'âge et coûts correspondants. [14]

Nous supposons qu'après le remplacement, le composant est neuf et que le temps du remplacement est négligeable.

Lorsque le composant atteint l'âge opérationnel  $T_0$ , le coût du remplacement préventif est de  $C_p$ , et le coût du remplacement correctif (avant  $T_0$ ) est de  $C_c$ .

Le temps entre deux maintenances consécutives est appelé période de remplacement [11]. Le temps moyen entre ces

changements en considérant le temps de remplacement  $T_0$  est de :

$$MTBR(T_0) = \int_0^{T_0} t \cdot f(t) dt + T_0 \cdot P(T \geq T_0) \quad (6)$$

$$MTBR(T_0) = \int_0^{T_0} (1 - F(t)) dt \quad (7)$$

avec  $f(t)$  la densité de probabilité du temps de panne  $T$ .

Le nombre moyen de remplacements,  $E_{T_0}(N(t))$ , dans un intervalle de temps de longueur  $t$ , peut être approximé par

$$E_{T_0}(N(t)) \approx \frac{t}{MTBR(T_0)} = \frac{t}{\int_0^{T_0} (1 - F(t)) dt} \quad (8)$$

où  $F$  est la fonction de répartition de  $T$ .

Notons  $R$  la fonction de fiabilité du système qui vérifie :

$$R(t) = 1 - F(t) \quad (9)$$

Le coût direct sur une période de remplacement est égal au coût de remplacement préventif  $C_p$  et au coût supplémentaire ( $C_c - C_p$ ) quand une panne apparaît.

$$C_p + (C_c - C_p) \cdot P(T < T_0) = C_c \cdot F(T_0) + C_p \cdot R(T_0) \quad (10)$$

Le coût moyen par unité temps  $C_A(T_0)$  avec une période de remplacement  $T_0$  est déterminé par :

$$C_A(T_0) \cdot MTBR(T_0) = C_c \cdot F(T_0) + C_p \cdot R(T_0) \quad (11)$$

Donc,

$$C_A(T_0) = \frac{C_c \cdot F(T_0) + C_p \cdot R(T_0)}{\int_0^{T_0} R(t) dt} \quad (12)$$

Nous nous focaliserons sur  $\overline{C_{A\infty}}$  le coût moyen par unité de temps sur un horizon infini.

$$\overline{C_{A\infty}}(T_0) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C_A(T_0)}{t} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{E(C_A(T_0))}{t} \quad (13)$$

En utilisant la théorie du renouvellement [2], nous obtenons sur le cycle  $T_{cycle}$ :

$$\overline{C_{A\infty}}(T_0) = \frac{E(C_A(T_0))}{E(T_{cycle})} \quad (14)$$

La figure 4 montre le coût moyen de maintenance par unité de temps sur un horizon infini. La fonction décroît rapidement jusqu'à une valeur minimale (à  $t=180$ ) puis augmente pour atteindre une valeur constante.

L'optimum de cette maintenance est obtenu pour  $T_0$  tel que :

$$\frac{d\overline{C_{A\infty}}}{dt}(T_0) = 0. \quad (15)$$

$T_0$  représente l'âge optimal de remplacement.

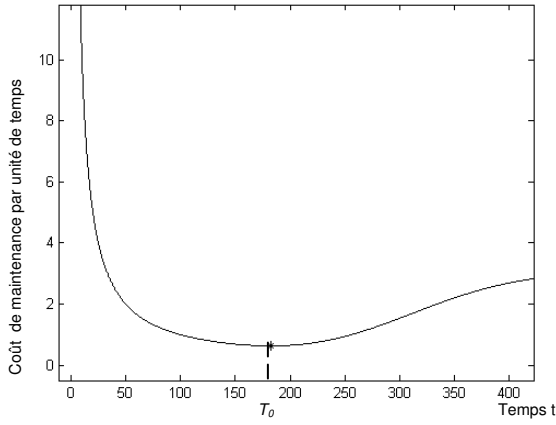


Figure 4. Coût de maintenance  $\overline{C}_{A\infty}(t)$  par unité de temps pour le remplacement basé sur l'âge.

### C. Maintenance conditionnelle

Dans une approche de maintenance conditionnelle, la décision est basée sur le niveau de dégradation observé. Il faut donc procéder à des inspections. Un seuil critique  $L_c$  est fixé par le fournisseur. Lorsque le niveau de dégradation  $Z$  dépasse le seuil  $L_c$ , le composant sera considéré comme en panne. Un second seuil  $L_p$  sera variable et permettra de déterminer le moment du changement préventif du composant.

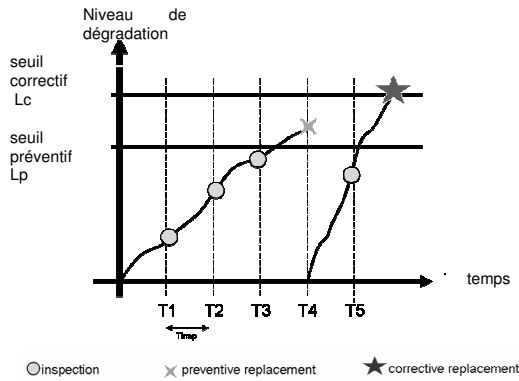


Figure 5. La maintenance conditionnelle

Le système est vérifié à des intervalles de temps réguliers  $T_i$  et le niveau de dégradation  $Z$  détermine le type d'opération de maintenance.

Si à  $T_i$ :

- (i)  $Z < L_p$ , le système fonctionne et un coût d'inspection  $C_i$  est ajouté.
- (ii)  $L_p \leq Z < L_c$ , le système doit être changé préventivement avec un coût  $C_p$ .

Pour comparer le coût direct de maintenance de cette politique avec la stratégie précédente, nous posons les mêmes hypothèses : Quand le niveau de dégradation  $Z$  atteint le seuil critique  $L_c$ , le composant est considéré comme en panne et il est changé immédiatement avec un coût correctif  $C_c$ .

Le coût direct de maintenance à  $t$  est alors égal à :

$$C_{CB}(t) = N_i(t).C_i + N_p(t).C_p + N_c(t).C_c \quad (16)$$

où  $N_i$  est le nombre total d'inspections,  $N_p$  est le nombre de remplacements préventifs,  $N_c$  est le nombre de remplacements

correctifs.

Nous nous focaliserons sur  $\overline{C}_{CB\infty}$  le coût moyen par unité de temps sur un horizon infini.

$$\overline{C}_{CB\infty} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{C_{CB}(t)}{t} = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{E(C_{CB}(t))}{t} \quad (17)$$

En utilisant la théorie du renouvellement [2], nous obtenons sur le cycle  $T_{cycle}$ :

$$\overline{C}_{CB\infty} = \frac{E(C(T_{cycle}))}{E(T_{cycle})} \quad (18)$$

Nous évaluerons ce coût par simulation. Pour un processus de dégradation donné, les valeurs  $N_i$ ,  $N_p$ ,  $N_c$  et du cycle  $T_{cycle}$  dépendent du seuil préventif et de la fréquence d'inspection qui sont les variables de décision. Pour trouver le coût minimal moyen par unité de temps, il faut trouver le meilleur réglage de ces variables de décision.

## IV. COMPARAISON DU COUT DE MAINTENANCE

Le but de cette partie est de comparer les coûts de maintenance par unité de temps des deux politiques présentées. L'étude se fera sur deux composants modélisés respectivement par un processus gamma et par un processus additif de Markov. Dans un premier temps, nous supposons que seule la loi de durée de vie (issue du modèle de dégradation) est connue. Nous appliquerons sur ce modèle une politique de maintenance basée sur l'âge et nous obtiendrons un temps de remplacement optimal  $T_0$  avec un coût minimal de maintenance. Dans un second temps, nous établirons une politique de maintenance conditionnelle utilisant le même modèle de dégradation que précédemment. Nous déterminerons ainsi les variables de décision (seuil préventif et la fréquence d'inspection) et le coût optimal de maintenance. Les deux coûts de maintenance obtenus seront alors comparés en fonction du coût d'inspection. Ceci permettra de déterminer le coût maximum d'inspection permettant d'avoir une maintenance conditionnelle rentable.

### A. Modèle de dégradation de type processus gamma

Le premier modèle de dégradation étudié est un modèle de dégradation de type processus gamma avec une moyenne  $E(\Delta Z) = \alpha/\beta = 1.1$  et une variance  $Var(\Delta Z) = \alpha/\beta^2 = 5$ .

A partir des équations 12 et 13, le temps  $T_0$  est égal à 59 pour avoir un coût de maintenance minimal avec le remplacement basé sur l'âge.

Le temps moyen entre deux changements  $MTBR(T_0)$  est égal à 58,8.

La figure 8 montre l'accumulation de la dégradation et la fonction de répartition, qui est calculée avec l'équation 4.

La figure 9 compare le coût de la maintenance conditionnelle et le coût optimal du remplacement basé sur l'âge (calculé avec les équations 11 et 13) avec un coût d'inspection fixé ( $C_i = 5$ ).

Seuls le seuil préventif et l'intervalle d'inspection sont variables. Le coût du remplacement basé sur l'âge est constant puisqu'il ne dépend pas de ces variables de décision alors que le coût de la maintenance conditionnelle augmente lorsque le seuil préventif est élevé et que la fréquence d'inspection est faible. Cela signifie que le composant pourrait être en panne avant l'inspection.

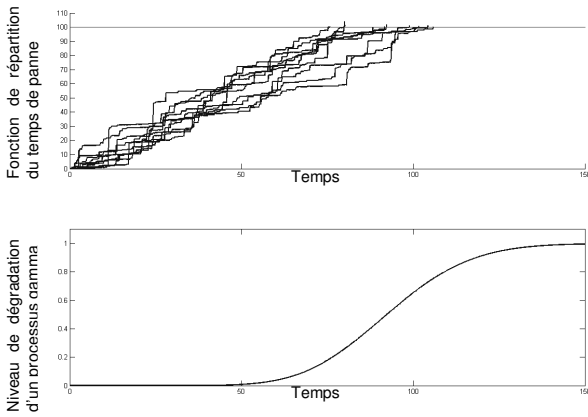


Figure 8. Niveau de dégradation et fonction de répartition du temps de panne.

Le domaine A1 représente les couples des seuils préventifs et des intervalles de temps d'inspection pour une maintenance conditionnelle plus avantageuse qu'un remplacement basé sur l'âge pour des coûts fixes d'opération de maintenance.

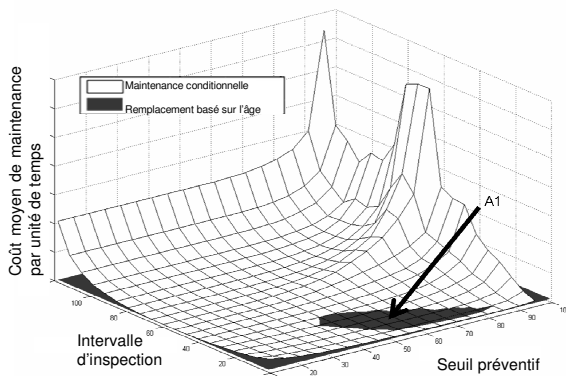


Figure 9. Coût moyen de maintenance par unité de temps pour un remplacement basé sur l'âge et une maintenance conditionnelle. ( $C_i/C_c = 0.05$ ,  $C_p/C_c = 0.2$ ,  $C_c = 500$ )

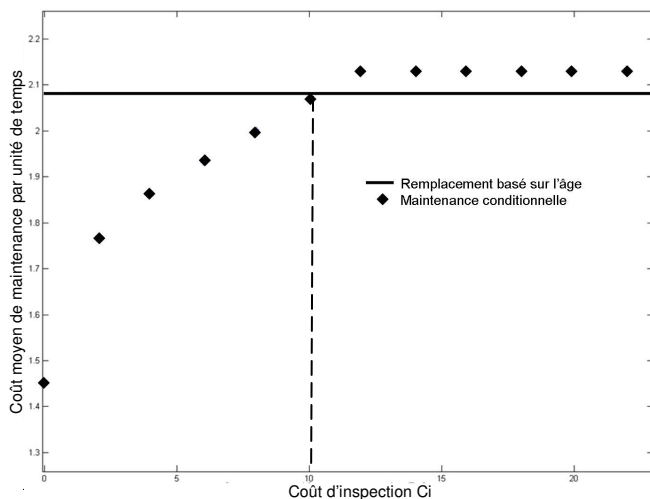


Figure 10. Coût moyen de maintenance par unité de temps comme une fonction du coût d'inspection.

Le coût de la maintenance conditionnelle dépend des coûts d'opération de maintenance, la fréquence d'inspection et du taux acceptable de panne. Il existe donc des cas où le domaine A1 est vide, ce qui permettrait de dire que la maintenance conditionnelle sera plus coûteuse que la maintenance basée sur l'âge. Supposons que les coûts préventifs et correctifs sont fixes et le coût d'inspection est variable mais respecte toujours

les hypothèses (5). La figure 10 représente le coût minimal de la maintenance par unité de temps (par rapport au seuil préventif et à la fréquence d'inspection) en fonction du coût d'inspection pour ces deux stratégies. Le coût optimal du remplacement basé sur l'âge est toujours constant car indépendant du coût d'inspection. Dans cet exemple, le coût de la maintenance conditionnelle est plus avantageux que celui de la maintenance basée sur l'âge si le coût d'inspection est inférieur à 10.

### B. Modèle de dégradation de type processus additif de Markov

Un modèle de type processus additif de Markov représente la dégradation d'un système qui est utilisé dans deux environnements différents. Le taux de dégradation est supposé double dans les conditions sévères.

- (i)  $0 \leq t < 20$  jours : conditions sévères
- (ii)  $20 \leq t < 40$  jours : conditions normales
- (iii)  $40 \leq t < 50$  jours : conditions sévères
- (iv)  $t \geq 50$  jours : conditions normales

Les processus de dégradation sont représentés par des processus gamma :

- (i) si les conditions sont normales :

$$E_1(\Delta Z) = \alpha_1 / \beta_1 = 1.1$$

$$Var(\Delta Z) = \alpha_1 / \beta_1^2 = 5$$

- (ii) si les conditions sont sévères :

$$E_2(\Delta Z) = \alpha_2 / \beta_2 = 2.2$$

$$Var(\Delta Z) = \alpha_2 / \beta_2^2 = 10.$$

A  $T_0=40$  (calculé avec les équations 12 et 13), le coût de maintenance est optimal avec le remplacement basé sur l'âge. Le temps moyen entre deux changements  $MTBR(T_0)$  est égal à 39.9.

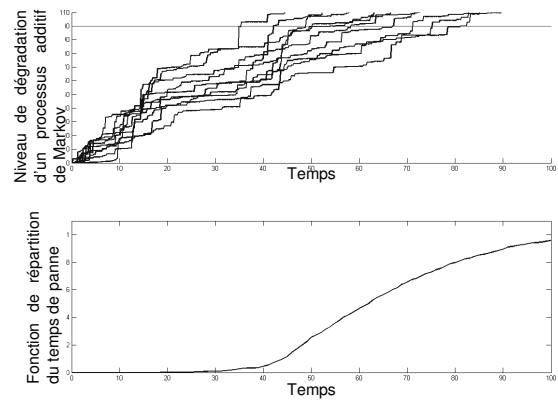


Figure 11. Niveau de dégradation et fonction de répartition du temps de panne

La figure 12 représente les coûts de maintenance avec un coût d'inspection fixe  $C_i = 5$ . Le coût de maintenance conditionnelle augmente lorsque la fréquence d'inspections et le taux de panne accepté sont importants.

Le domaine A2 représente les couples de seuils préventifs et d'intervalles de temps pour les inspections pour une maintenance conditionnelle plus avantageuse que la première stratégie. Comme le modèle de dégradation précédent, une étude sur le coût d'inspection a été faite. La figure 13 montre que le coût de maintenance conditionnelle croît avec le coût d'inspection.

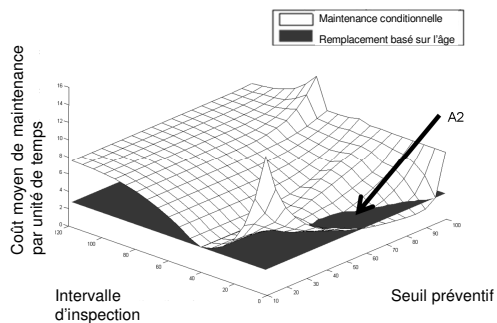


Figure 12. Coût moyen de maintenance par unité de temps pour un remplacement basé sur l'âge et une maintenance conditionnelle. ( $C_i/C_c = 0.05$ ,  $C_p/C_c = 0.2$ ,  $C_c = 500$ )

Dans cet exemple, si le coût d'inspection est inférieur à 46, la maintenance conditionnelle sera alors plus avantageuse que le remplacement basé sur l'âge. Cette limite du coût d'inspection dépend de l'environnement dans lequel évolue le système.

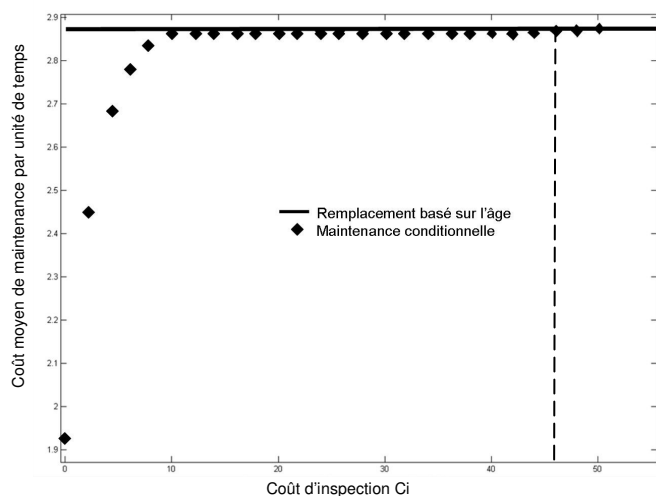


Figure 13. Coût moyen de maintenance par unité de temps en fonction du coût d'inspection.

### C. Synthèse des résultats

La maintenance conditionnelle a pour avantage de suivre la dégradation réelle du composant et de décider la date de la maintenance en tenant compte de cette usure. Bien que l'on aurait pu considérer cette stratégie comme la mieux adaptée pour le composant, en comparaison à la politique basée sur l'âge, celle-ci ne tenant compte que de l'état de fonctionnement du composant, ces deux exemples permettent de montrer qu'il existe une limite au niveau du coût d'inspection pour avoir une politique de maintenance conditionnelle plus rentable qu'une stratégie de maintenance basée sur l'âge.

Le coût de maintenance conditionnelle dépend des variables de décision et du coût d'inspection. Fixant ces variables de décision, la limite de coût d'inspection sera plus ou moins grande en fonction de la dégradation du composant. Afin d'avoir une maintenance conditionnelle plus avantageuse qu'une maintenance basée sur l'âge, la limite du coût d'inspection sera plus élevée pour un composant qui évolue dans un environnement opération très variable que pour un composant qui évolue dans un environnement fixe. Ceci résulte de la propriété de la maintenance conditionnelle à suivre la dégradation réelle du composant.

## V. CONCLUSION

Cet article compare les coûts de deux politiques de

maintenance. Le remplacement basé sur l'âge est une stratégie qui consiste à remplacer le composant à un âge opérationnel  $T_0$  ou lorsqu'il tombe en panne avant  $T_0$ . La maintenance conditionnelle est une politique qui décide de l'opération de maintenance en fonction du niveau de dégradation du composant.

Ces deux politiques sont comparées suivant le critère du coût moyen de maintenance par unité de temps avec des modèles de dégradation. La dégradation d'un composant peut être modélisée par un simple processus de gamma. Cependant, les composants sont de plus en plus soumis à des contraintes variables qui dépendent de l'environnement et des conditions d'utilisation. Ce type de dégradation est alors modélisé grâce au processus de Markov additif.

Cet article montre qu'il existe une limite (sur le coût d'inspection) permettant d'avoir une maintenance conditionnelle plus avantageuse qu'un remplacement basé sur l'âge. A partir d'exemples, nous montrons que l'environnement opérationnel a une forte influence sur cette limite.

## VI. RÉFÉRENCES

1. Abdel-Hameed M. A gamma wear process. IEEE Transactions on Reliability; 24(2): 152-153,1997
2. Asmussen S. Applied Probability and Queues. Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics, New York, 1987.
3. Aven T., Jensen, U. Stochastic Models in Reliability, Series Applications of Mathematics - Stochastic Modelling and Applied Probability, Springer; vol. 41, 1999.
4. Barlow R.E., Proschan F. Mathematical Theory of Reliability, SIAM, Classics in applied mathematics; vol. 17. Previously published by John Wiley & Sons, Inc., New York, 1996.
5. Çinlar E. Shock and Wear Models and Markov Additive Processes. In The Theory and Applications of Reliability, Academic Press, New York; 193-214, 1977.
6. Dagg R. A. Optimal Inspection and Maintenance for Stochastically Deteriorating Systems. Ph.D. thesis, 1999.
7. Dekker R., Scarf P.A. On the Impact of Optimisation Models in Maintenance Decision Making: the State of the Art, RESS; vol. 60, n° 2: 111-119, 1998.
8. Grall A., Bérenguer C., Dieulle L. A condition-based maintenance policy for stochastically deteriorating systems. Reliability Engineering & System Safety; 76: 167-180,2002.
9. Gertsbakh I. Models of Preventive Maintenance, North-Holland, Amsterdam - New York - Oxford, 1977.
10. Gertsbakh I. Reliability Theory - With Applications to Preventive Maintenance, Springer, Berlin, 2000.
11. Meeker W.Q., Escobar L.A. Statistical Methods for Reliability Data, John Wiley & Sons, 1998.
12. Nikulin M., Gerville-Réach L., Couallier V. Statistique des essais accélérés. Lavoisier, Paris, 2007.
13. Van Noortwijk J.M. A survey of the application of gamma processes in maintenance, Reliability Engineering and System Safety, vol. 90, 12, 2008.
14. Rausand M., Høyland, A. System Reliability Theory. Models, Statistical Methods, and Applications. Second Edition. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, 2004.
15. Singpurwalla N. Survival in Dynamic Environments, Statistical Science; Vol. 10: 86-103, 1995.