

Modélisation de l'évolution dynamique du changement d'état des roulements

Azzedine BOUZAOUIT
Laboratoire de recherche LRPCSI
Université de Skikda, Algérie
E-mail. bouzaouit21@gmail.com

Ouafae BENNIS
Laboratoire de recherche PRISME
IUT de Chartres, France
ouafae.bennis@univ-orleans.fr

Mounir GAHGAH
Département de Génie Mécanique
Université de Skikda, Algérie
facta236@gmail.com

Résumé-- La maintenance prédictive est utilisée pour améliorer la disponibilité des organes industriels tout en minimisant les coûts de la maintenance. Le suivi de l'évolution des défauts et la détection précoce s'appuient sur des contrôles périodiques afin d'éviter les pannes et pour en prévoir les opérations de maintenance jugées utiles dont le but de garantir un fonctionnement normal par la suite. Donc on parle de l'avenir en connaissant le présent.

Dans ce contexte, nous sommes entrain de discuter un modèle stochastique basé sur une chaîne de Markov de type $(X_n, n = 1, 2, 3, \dots)$. C'est-à-dire, si $X_n = i$ alors le processus est dit à état i au temps n avec l'existence d'une probabilité P_{ij} pour que ce processus sera dans l'état j au temps $n+1$. Ainsi, la distribution conditionnelle d'un futur état X_{n+1} est indépendante des états passés mais elle est dépendante seulement de l'état présent X_n .

Dans cette étude, nous avons présenté la méthodologie qui permet de modéliser l'évolution de la dégradation survenant dans les pièces mécaniques, le cas étudié il s'agit du processus de la dégradation des roulements à double rangées et qui sont installés sur des ventilateurs centrifuges de moyenne puissance.

A chaque roulement, nous proposons d'associer une chaîne de Markov décrivant la transition d'un état (i) à un autre état (j) suite à l'évolution du niveau global de la vibration, sachant que d'après les normes (NF, ISO, VDI, API...) le processus de dégradation de l'importe quel organe mécanique passe par des états tels que: "Bon", "Admissible", "Encore admissible" et "Inadmissible".

Le modèle proposé permet de calculer la probabilité d'avoir un roulement dégradé le long de sa durée de vie. De plus, il est possible d'utiliser la matrice de transition associée à la chaîne de Markov dans le cadre d'une analyse de fonctionnement pour la détermination de la fiabilité d'un système mécanique.

Mots clés: Maintenance conditionnelle, vibration, modélisation, Chaîne de Markov.

I. INTRODUCTION

La mise en place d'un modèle d'estimation d'un état revêt une importance considérable dans la maintenance. La maintenance prédictive donc est devenue ces dernières années un objectif capital de l'industrie. Considérée nécessaire, voir même indispensable, par les secteurs de haute technologie [1], elle devient également les soucis des petites et moyennes entreprises afin d'optimiser la production, augmenter la sécurité du personnel et faire réduire les coûts de la maintenance corrective ou préventive régulière.

Le présent travail porte sur le problème d'estimation de l'état réel d'un organe mécanique (le cas étudié il s'agit du suivi de la dégradation d'un roulement). On part de la constatation que la connaissance de l'état est un des impératifs de base de toute prise de décision, sachant que lors de l'étude de la conception d'une pièce ou d'un organe industriel, il est indispensable de prendre en compte les différents états par lesquels cette pièce passe au cours de sa dégradation et qu'elle est susceptible de subir tout au long de sa durée de vie, aussi bien lors de son fonctionnement "normal" que de manière inattendue (suite à une surcharge, vibration, un choc...).

A cet effet, on doit adapter des outils nécessaires pour estimer, fiabiliser et de bien gérer les informations

décillées d'un indicateur de surveillance tels que les signaux vibratoires [2]. Cette fonction dépend des différentes phases ou états du processus de dégradation de l'organe mécanique à savoir l'état "bon", "admissible", "encore admissible", et l'état "inadmissible" d'un coté et l'amplitude vibratoire d'autre coté avec la prise en compte de la taille de cette pièce.

Dans ce contexte, nous avons basé sur l'analyse de l'évolution d'un indicateur scalaire qui est le niveau global de la vibration, ce dernier a pour objectif de qualifier l'état général d'un organe par la comparaison à des normes ou des mesures précédentes (analyse évolutive basée sur un historique). La périodicité des mesures vibratoires est adaptée en fonction de l'évolution des indicateurs. Plus une augmentation est rapide, plus les contrôles doivent être rapprochés.

Il est à noter que les conditions d'exploitation des machines en questions (Vitesse, charge, température, ...) soient rigoureusement identiques lors d'une mesure vibratoire à d'autre.

La quantification des seuils vibratoires [3] est très délicate et dépend de nombreux paramètres, tels que la qualité de montage (supports, paliers, alignement,...), la tolérance admissible prévu par le constructeur, vécu de la machine, besoins de l'utilisateur... Cependant, des ordres de grandeurs limitant les différents états cités ci-dessus

sont indiqués dans les normes (NF, ISO, VDI, API...). Ces normes (Figure.1) ne doivent être pris que comme des suggestions et non comme une référence absolue. En début du suivi, les seuils peuvent se référer aux normes, mais ils ne seront fixés qu'après retour à l'expérience.

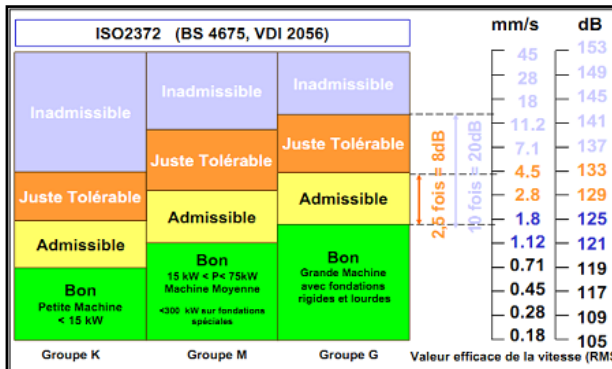


Figure 1. Seuils de jugement des niveaux vibratoire des machines [3].

II. HYPOTHESES

Les hypothèses prises en considérations au cours de cette analyse sont les suivantes:

- Les mesures des vibrations sont réalisées dans les mêmes conditions de fonctionnement des machines.
- Les roulements jugés en état inadmissible (dégradation avancée) sont suivi directement par une opération de changement.
- On programme des opérations de maintenance pour réduire le niveau vibratoire que pour les roulements possédant des états "admissible" et "encore admissible".
- Les vibrations enregistrées durant la période de rodage sont négligées.

III. METHODOLOGIE DU TRAVAIL

L'étude proposée est également envisagée pour le suivi du processus de la dégradation des roulements à doubles rangées de rouleaux. Cela permet, entre autres, d'évaluer la durée de fonctionnement limite ainsi que l'évolution dans le temps du changement d'état et ce pour en prévoir le changement.

Dans beaucoup de situations, la dégradation d'un roulement se manifeste par un début d'écaillage, c'est pour quoi il est préconisé de programmer des mesures vibratoires à différentes intervalles de temps régulières appelées "classe d'âge ou périodicité de mesure".

Comme nous avons dit, l'évolution de la dégradation d'un roulement [4] est exprimé par un passage d'un état «Bon» à un autre «dégradé ou inadmissible» en passant par des états intermédiaires «admissible» et "encore admissible". Ces états sont données par un nombre entier décrivant le nombre des états considérés: 1,2,..., N. (notre cas N=4).

Dans cette perspective, nous allons considérer que chaque dégradation passe obligatoirement par ces états, donc on va obtenir une suite croissante composée des états allant dans le sens de la dégradation avec la prise en compte des actions de maintenance effectuée lors d'un

changement d'état.

Par exemple, si un roulement est à l'état "admissible" ou "encore admissible" à l'instant (t), il peut être à un état "bon" à l'instant (t+1) et ce tout dépend des opérations de maintenance effectuées (nettoyage, vérification de la qualité du lubrifiant,...) mais s'il s'agit d'un état "inadmissible" un changement sera directement programmé.

Donc, l'objectif est de faire associer un modèle mathématique (matrice de transition de Markov) aux résultats obtenus lors d'une étude statistique déjà faite sur le suivi de la dégradation d'un lot de 60 roulement [4], installés sur des ventilateurs centrifuges au niveau du complexe sidérurgique (Arcelor-Mittal), ces derniers sont installés pour assurer le bon fonctionnement d'un four rotatif horizontal, ils sont exploités dans les mêmes conditions.

La campagne des mesures vibratoires est étalée sur une intervalle de 30 mois ($t = 0, \dots, 30$) avec une périodicité de mesure de deux mois, donc on se trouve devant 15 mesure vibratoire dont les résultats sont reportés sur le tableau 1.

Tableau 1. Résultats du suivi périodique des roulements

N° mesure	Etat du roulement i = 1,2,3,4				En service
	Bon	Admissible	Encore admissible	Inadmissible	
1	60	0	0	0	60
2	52	2	6	0	60
3	47	8	2	3	57
4	42	5	4	6	51
5	41	7	2	1	50
6	38	4	5	3	47
7	35	5	3	4	43
8	25	2	10	6	37
9	21	4	4	8	29
10	16	2	4	7	22
11	9	2	4	7	15
12	4	5	0	6	9
13	3	3	3	0	9
14	0	1	3	5	4
15	0	0	0	4	0

Tableau 2. Probabilités calculées des états de roulements

Nombre cumulé des roulements dégradés	Probabilité de dégradation	Probabilité de survie	P _j (1)	P _j (2)	P _j (3)
0	0,00	1,00	0,00	0,00	0,00
0	0,00	1,00	0,03	0,10	0,00
3	0,05	0,95	0,13	0,03	0,05
9	0,15	0,85	0,09	0,07	0,11
10	0,17	0,83	0,14	0,04	0,02
13	0,22	0,78	0,08	0,10	0,06
17	0,28	0,72	0,11	0,06	0,09
23	0,38	0,62	0,05	0,23	0,14
31	0,52	0,48	0,11	0,11	0,22
38	0,63	0,37	0,07	0,14	0,24
45	0,75	0,25	0,09	0,18	0,32
51	0,85	0,15	0,33	0,00	0,40
51	0,85	0,15	0,33	0,33	0,00
56	0,93	0,07	0,11	0,33	0,56
60	1,00	0,00	0,00	0,00	1,00
Probabilité moyenne			0,11	0,12	0,21

Avec:

P_{ij} (1) : Probabilité de passage à l'état "admissible" au temps (t) sachant qu'il soit à l'état "Bon" au temps (t-1).

P_{ij} (2): Probabilité de passage à l'état "encore admissible" au temps (t) sachant qu'il est "admissible" au temps (t-1).

P_{ij} (3): Probabilité de passage à l'état "inadmissible" au temps (t) sachant qu'il est "encore admissible" temps (t-1).

IV. PRESENTATION DU MODELE

Une chaîne de Markov est une suite de variables aléatoires ($X_n, n \in \mathbb{N}$) qui permet de modéliser l'évolution dynamique d'un système aléatoire, X_n représente l'état du système à l'instant n.

La propriété fondamentale d'une chaînes de Markov [5] dite propriété de Markov, est que son évolution future ne dépend du passé qu'au travers de sa valeur actuelle. Autrement dit, conditionnellement à X_n , (X_0, \dots, X_n) et ($X_{n+k}, k \in \mathbb{N}$) sont indépendants.

Les applications des chaînes de Markov sont très nombreuses (réseaux, génétique des populations, mathématiques financières, gestion de stock, algorithmes stochastiques d'optimisation, simulation,).

Nous pouvons alors définir la loi de "probabilité de transition" d'un état i vers un autre état j par :

$$P_{ij} = P(X_n = j | X_{n-1} = i), \quad (1)$$

A chaque roulement (ou chaque pièce), nous proposons d'associer une chaîne de Markov reflétant son passage d'un état à un autre.

A cet effet, il est possible de présenter les paramètres du modèle sous une forme graphique sur laquelle, on exprime les différents états et les probabilités qui les relient. D'après les normes (figure 1.), chaque roulement pendant son fonctionnement doit passer par quatre états, on dessine donc quatre cercles symbolisant chacun les évènements: A : Bon, B : Admissible, C : Encore admissible et D: Inadmissible.

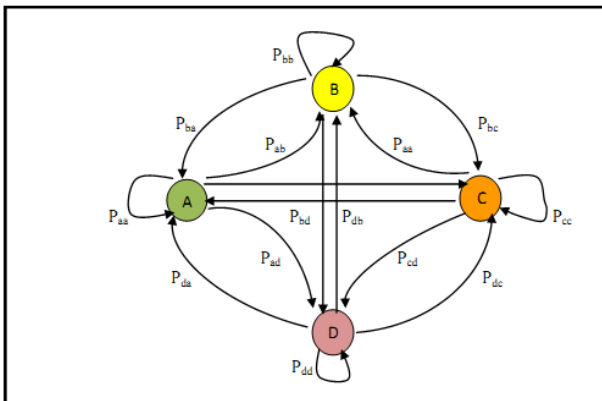


Figure 2. Modèle de Markov sous forme graphique

En se basant sur le modèle graphique, on déduit la matrice de transition suivante:

$$M = \begin{bmatrix} P_{aa} & P_{ab} & P_{ac} & P_{ad} \\ P_{ba} & P_{bb} & P_{bc} & P_{bd} \\ P_{ca} & P_{cb} & P_{cc} & P_{cd} \\ P_{da} & P_{db} & P_{dc} & P_{dd} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

Le changement d'état d'un roulement est un processus Markovien et qui est décrit par la matrice de transition ci-dessus, sachant qu'une matrice de transition de Markov est spécifiée par:

- Les coefficients (P_{ij}) soient toujours inférieurs ou égale à 1.
- La somme des coefficients de la même ligne soit égale 1.

En fin, pour calculer la probabilité du processus de dégradation du roulement d'après le modèle Markovien proposé, il suffit de calculer la puissance de la matrice de transition à un ordre qui correspond à une classe d'âge déterminée, c'est-à-dire pour la classe d'âge ($n = 1, 2, 3, \dots, 15$), le modèle décrivant les probabilités du changement d'état est présenté sous la forme:

$$\begin{aligned} X^{(1)} &= X^{(0)} \cdot M \\ &\vdots \\ X^{(n)} &= X^{(n-1)} \cdot M \end{aligned} \quad (3)$$

Ou bien;

$$\begin{aligned} X^{(1)} &= X^{(0)} \cdot M^1 \\ &\vdots \\ X^{(n)} &= X^{(0)} \cdot M^n \end{aligned} \quad (4)$$

Avec: $X^{(n)}$ est la matrice ligne qui donne les probabilités des différents états du roulement à la classe d'âge (n).

$X^{(n-1)}$: représente la matrice ligne des probabilités correspondantes aux différents états du roulement pour la classe d'âge (n-1).

M: c'est la matrice de transition de Markov.

V. DISCUSSION DES RESULTATS

D'après les données illustrées sur le Tableau (2), les probabilités moyennes du changement d'état sont respectivement: 0.56, 0.11, 0.12 et 0.21.

De la même chose, pour la quatrième ligne de la matrice, les probabilités (P_{da}, P_{db}, P_{dc}) étant nulle, par ce que d'après l'hypothèse (2) un roulement dans un état inadmissible au temps (t) ne peut être dans un état admissible ou bon après une classe d'âge correspondante au temps (t+1), d'autre part, la somme des coefficients de chaque ligne d'une matrice de Markov est égale à 1.

Donc, la matrice de transition est représentée par:

$$M = \begin{bmatrix} 0.56 & 0.11 & 0.12 & 0.21 \\ 0 & 0.15 & 0.50 & 0.35 \\ 0 & 0.13 & 0.17 & 0.70 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

Prenons l'hypothèse qu'un roulement est considéré bon au bout de la première classe d'âge, c'est-à-dire:

$$X^{(0)} = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

Au début de la deuxième classe d'âge, on peut prédire :

$$X^{(1)} = X^{(0)} \cdot M = M_1$$

Donc, on a:

$$M_1 = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} 0.56 & 0.11 & 0.12 & 0.21 \\ 0 & 0.15 & 0.50 & 0.35 \\ 0 & 0.13 & 0.17 & 0.70 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ = [0.56 \quad 0.11 \quad 0.12 \quad 0.21]$$

Ainsi, après la première mesure de vibration (correspond à la première classe d'âge), on a 56 % de chances que le roulement est encore en état bon, 11 % en état admissible, 12 % encore admissible et 21% de roulement en état inadmissible ou dégradé.

Après une durée de service (représentée par une classe d'âge bien définie (n), notre modèle sera donner par:

$$X^{(n)} = X^{(0)} \cdot M^n = M_n$$

$$M_n = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} 0.56 & 0.11 & 0.12 & 0.21 \\ 0 & 0.15 & 0.50 & 0.35 \\ 0 & 0.13 & 0.17 & 0.70 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^n$$

Et ainsi de suite, pour la dernière mesure vibratoire qui correspond à la 15^{ième} classe d'âge (30 mois de service), on obtient:

$$X^{(n)} = X^{(0)} \cdot M^{15} = M_{15}$$

$$M_{15} = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \begin{bmatrix} 0.56 & 0.11 & 0.12 & 0.21 \\ 0 & 0.15 & 0.50 & 0.35 \\ 0 & 0.13 & 0.17 & 0.70 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{15} \\ = [0.0001 \quad 0.0001 \quad 0.0001 \quad 0.9995]$$

Ces puissances convergent rapidement vers une matrice ligne fixe, cela signifie qu'après avoir calculé la 15^{ième} puissance, la matrice ne change pratiquement plus.

D'après les méthodes de calcul classiques en probabilités et statistiques, les différentes probabilités décrivant le changement d'état d'un roulement en fonction de la classe d'âge sont données par la figure 3:

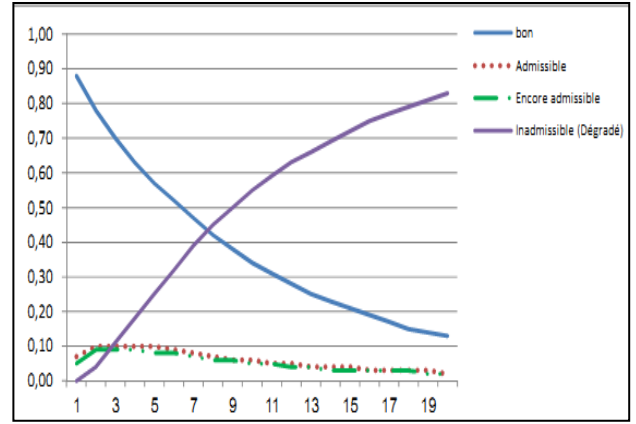
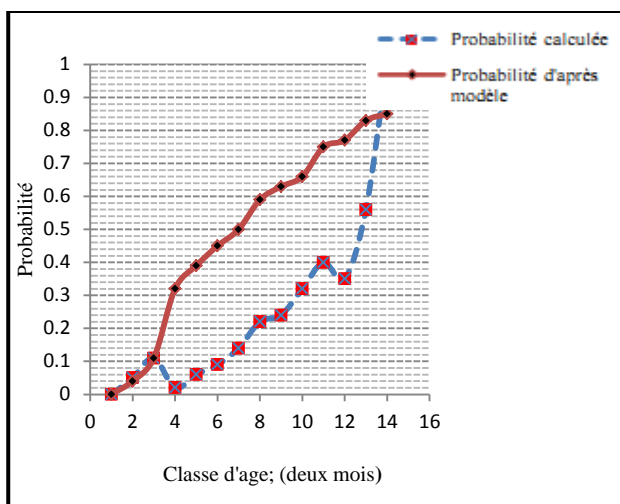


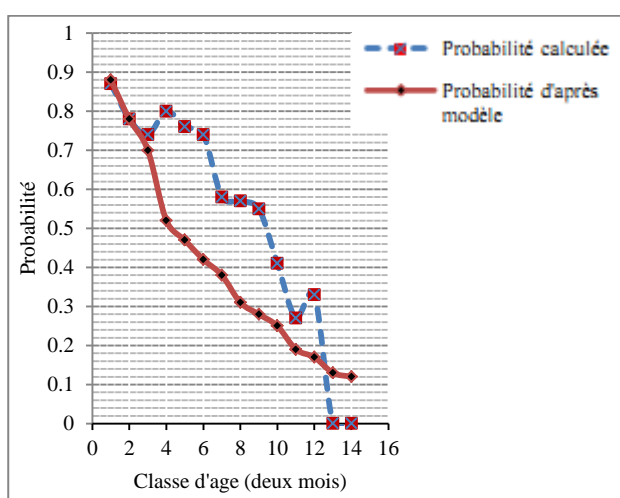
Figure 3. Probabilités des différents états d'après le modèle proposé

D'autre part, les résultats obtenus montrent clairement que le modèle proposé apporte une bonne estimation de la probabilité du changement d'état ainsi que le passage d'un état bon à un autre. En plus, on remarque que les fonctions des probabilités calculées par le modèle (figure 4a et 4b) portent la même allure que celles calculées par des méthodes classiques, en se basant aussi sur les valeurs du coefficient de corrélation pour les fonctions représentatives de l'état 'bon' et celui 'inadmissible' et qui sont respectivement ($r = 0,77; 0,85$), on peut confirmer que les résultats obtenus par l'utilisation du modèle proposé sont très proche à la réalité, mais avec un avantage pour le modèle de Markov qui permet de bien représenter les propriétés statistiques d'un système mécanique et de réaliser des prédictions efficaces sans décrire la structure complète de ce système. Ainsi un modèle markovien est souvent invoqué lorsque des probabilités sont utilisées pour modéliser le processus du changement d'état, en supposant toutefois que l'état futur peut être déduit de l'état présent sans passer par l'analyse de l'historique d'un système

Comme, nous avons considéré dans cette étude un roulement de type (graissé à vie), le suivi de son état permet la préparation pour programmer l'opération de changement de celui-ci au moment nécessaire à fin d'améliorer la fiabilité de la machine. Notre modèle fournit donc l'information que l'on cherche à savoir sur l'état réel du roulement.



(a)



(b)

Figure 4. Probabilités calculées selon (modèle / méthodes statistiques)
 (a): Etat inadmissible (dégradé), (b): Etat bon

VI. CONCLUSION

En maintenance systématique, la décision pour le changement d'un roulement dépend de la probabilité de risque qu'on veut prendre, cette décision est prise en fonction du seuil vibratoire atteint. On ne changera jamais un roulement lorsque les niveaux sont toujours acceptables ou admissibles, comme il est nécessaire d'éviter le dépassement du seuil de danger, car à partir de ce dernier, un roulement est possible d'être détériorer à tout moment. Pour cela l'utilisation de l'analyse vibratoire permet systématiquement de faire une évaluation sur l'état réel du comportement de tout équipement. En cas du défaut, c'est une aide inestimable pour identifier et en évaluer l'anomalie.

L'étude présentée montre que le modèle Markovien proposé pour le suivi de l'évolution de la dégradation d'un roulement graissé à vie décrit avec précision son état réel et fournit une bonne prédiction de la panne. Ce modèle doit aussi pouvoir aider à la planification des opérations de la maintenance prédictive pour éviter les imprévues.

Les résultats obtenus nous renseignent sur les

probabilités relatives aux états réels du roulement étudié. Ceci ouvre la voie à une étude généralisée sur les autres types de roulements avec la prise en compte des opérations préventives à fin d'améliorer leur fonctionnement.

REFERENCES

1. Alain Boulenger, Christian Pachaud, (2007) ANALYSE VIBRATOIRE EN MAINTENANCE, Surveillance et diagnostic des machines.
2. BOUZAUIT A., CHAIB R., HADJADJ A.E. (2006) Statistical study on the bearing's degradation, RECENT Journal ISSN 1582-0246, pp: Vol. 07, No. 3 (18).
3. Philippe VERVOORT, Utilisation des contrôles vibratoires en maintenance, Bruel et Kjaer Vibro.
4. BOUZAOUIT A., BENNIS O., BENOTMANE Z., (2011) Application of Markov chain for monitoring the bearing roller degradation, Journal of Engineering Studies and Research – Volume 17, No. 1, pp: 7-12.
5. G. Saporta, (1992) Probabilités, analyse des données statistiques, ISBN 2-7108-0565-0.