

Programme de calcul des paramètres optima du renouvellement préventif.

Kamande Wa K.L.^{1*}, Kalume M.J.², Mulapi W.E.¹

Paper History

Received:
November 4, 2016

Revised:
August 19, 2017

Accepted:
March 31, 2018

Published:
July 27, 2018

Keywords:

Kelly, renewal, replacement, cost, time, gain, maintenance, abacus, Weibull, matlab, preventive

ABSTRACT

Program for calculation of preventive renewal optima parameters.

Kelly charts, plotted for two-parameter Weibull reliability, prevent from complex calculations in determination of the optima parameters for preventive renewal maintenance when economic data and the shape parameter of Weibull distribution are given. However, the position parameter corresponds to a time origin gap and a reliability study could be planned to start on used components or equipment. In this case this parameter value is not necessarily zero. Due to the fact that systematic preventive maintenance could lead to increased costs if poorly managed, we propose an extension of Kelly charts. A program for calculating optimum preventive renewal parameters (time, preventive cost, corrective cost,...) for a material whose reliability follows the Weibull law for any position parameter value is presented. The program is written in matlab and a graphic user interface (GUI) had been elaborated to avoid any deformation of the source code.

¹Laboratoire d'Hydraulique, Département de Mécanique, Faculté Polytechnique, Université de Kinshasa B.P. 255 Kinshasa XI, R.D. Congo

²Commercial Department, Engen B.R. Congo SA, B.P. 2799 Kinshasa-Gombe, R.D. Congo

* To whom correspondence should be addressed : kamande.l@live.fr

INTRODUCTION

Des profits économiques peuvent être obtenus à partir d'une maintenance efficace. Environ 15 à 40% de coût de la production peuvent être attribués aux activités de la maintenance [SAVSAR, 2013 ; AL-NAJJAR et al., 2002; BLOCH, 1998]. Ainsi, les stratégies de la maintenance et de la production ont un impact direct sur les performances des entreprises [SALTOGLU et al., 2016 ; FAYÇAL et al., 2015 ; BRUNET, 2009 ; FRANCASTEL, 2009 ; KUMAR et al., 2016]. Les entreprises peuvent donc accroître leur capacité de production, sans investissement dans les machines, mais juste en adoptant une bonne politique de la maintenance [AL-NAJJAR et al., 2002].

Les travaux de maintenance comprennent souvent des remplacements ou des mises à niveau majeures [BEEBE, 2004]. Il est donc important, pour une machine (ou un système) comportant un organe défaillant, d'étudier les conséquences des décisions que l'on puisse prendre au sujet de son remplacement [LEI, 2017].

Les abaques de Kelly sont fortement utilisés dans la détermination des paramètres optima en maintenance préventive systématique. Ils donnent le coût moyen minimal et le temps d'intervention correspondant. L'intérêt de cet outil réside dans sa grande rapidité d'utilisation des paramètres économiques et du paramètre de forme de la loi de Weibull en vue d'une détermination graphique des coordonnées du point optimum. Mais, malheureusement, ils se limitent à calculer uniquement pour la loi de Weibull à deux paramètres (paramètre d'échelle nul).

L'objectif de cette étude consiste à étendre les abaques de Kelly en présentant un programme de calcul des paramètres optima de renouvellement préventif pour une loi de Weibull à trois paramètres et en plus pour quatre cas de renouvellement. Dans la suite, nous comparons les résultats trouvés après calcul par ce programme à

ceux calculés par utilisation des abaques de Kelly ou manuellement.

LOI DE WEIBULL ET ESTIMATEURS DE LA FIABILITÉ

Loi de Weibull

La loi de Weibull est très souple, ce qui lui permet de s'ajuster à un grand nombre d'échantillons prélevés le long de la vie d'un équipement [TAYLOR et al., 2013 ; COPELAND et al., 2003]. Cette loi est très utilisée en fiabilité, en particulier dans le domaine de la mécanique.

Elle est donnée par la relation:

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (1)$$

avec:

- $t > \gamma$
- $R(t)$: la fonction fiabilité.

Elle représente l'aptitude d'un système ou d'un composant à accomplir les fonctions prévues dans des conditions précises et pendant une période de temps spécifiée [IEEE, 1990; KENNA et al., 2008; TAYLOR et al., 2013]

β , η et γ sont les trois paramètres de la loi de Weibull

β : le paramètre de forme (sans unité), $\beta > 0$. Il permet d'orienter un diagnostic, sa valeur étant caractéristique de certains modes de défaillance (infantile, vie utile, vieillissement: usure, fatigue,...) [BALAKRISHNAN et al., 2001]

η : le paramètre d'échelle (unités de temps), $\eta > 0$. Sa modification entraîne des variations proportionnelles

γ : le paramètre d'origine de temps ou de position (unités de

temps). Si $\gamma=0$, tous les éléments constituant l'échantillon sont neufs (la loi de Weibull est alors dite à deux paramètres). Pour $\gamma < 0$ les composants utilisés ont déjà fonctionné avant l'origine de temps adopté et il y a eu des pannes qui ont entraîné le remplacement des composants défectueux. $\gamma > 0$ si certains composants ont déjà fonctionné avant l'origine de temps adopté mais sans subir des pannes.

Moyenne des temps de bon fonctionnement

La moyenne de temps de bon fonctionnement (MTBF) est un indicateur de la fiabilité. Elle représente le temps moyen de fonctionnement entre deux défaillances consécutives d'un composant ou système [TAYLOR et al., 2013].

Elle est donnée par la relation :

$$MTBF = \int_{-\infty}^{+\infty} R(t) dt \quad (2)$$

Pour la loi de Weibull, les relations (1) et (2) conduisent à :

$$MTBF = \gamma + \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (3)$$

Taux de défaillance

Le taux instantané de défaillance, $\lambda(t)$ est un autre estimateur de la fiabilité. Il caractérise la vitesse de la variation de la fiabilité au cours du temps. Il évolue souvent suivant une courbe en « baignoire » principalement pour les équipements électromécaniques [DUCHEMIN, 2017 ; BEEBE, 2004].

Il est donné par la relation :

$$\lambda(t) = -\frac{dR(t)}{dt} * \frac{1}{R(t)} \quad (4)$$

Les relations (1) et (4) conduisent à :

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} * \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (5)$$

D'après JIANG et al. [2015] ; LANTERNIER et al. [2006] ; MACISAAC et al. [2011] :

- $\beta < 1$, $\lambda(t)$ est décroissant et correspond à la phase de la jeunesse;
- $\beta = 1$, $\lambda(t)$ est constant et caractérise la phase de la maturité;
- $\beta > 1$, $\lambda(t)$ est croissant et caractérise un vieillissement

DIFFÉRENTS TYPES DE RENOUELEMENT PRÉVENTIF

Suivant les technologies concernées et le domaine d'actualisation (production, entrepôt, transport, ...), le renouvellement préventif peut s'exercer de différentes façons [LYONNET, 2000 ; BALAKRISHNAN et al., 2001]. Ainsi, on différencie :

- le renouvellement à âge fixe :
 - ◆ approche simplifiée (modèle de Kelly)
 - ◆ modèle non simplifié
- le renouvellement préventif périodique 'as good as news'
- le renouvellement préventif périodique 'as bad as old' et
- le renouvellement collectif

Renouvellement à âge fixe

La stratégie de maintenance de type âge fixe consiste à faire un remplacement préventif seulement lorsque l'équipement a atteint l'âge T_0 , la période de remplacement préventif choisie. La durée de la période T_0 est déterminée de façon à effectuer un

remplacement préventif un peu avant le moment où on estime que l'équipement risque de tomber en panne. Toutefois, si une panne

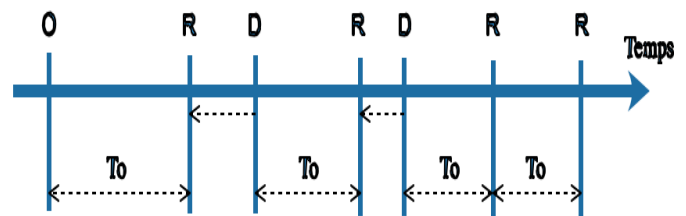


Figure 1 | Schéma de remplacement selon l'âge de l'équipement à T_0 fixé R=remplacement préventif, D=remplacement sur défaillance.

survient avant l'âge T_0 , un remplacement correctif est effectué [GHARBI et al., 2001].

La durée de vie moyenne est estimée par :

$$MTBF_{T_0} = \int_{-\infty}^{T_0} R(t) dt < MTBF \quad (6)$$

Approche simplifiée, modèle de Kelly

Le coût moyen d'un remplacement préventif est donné par la relation [BELMOKHTAR et al., 2002 ; LYONNET, 2000] :

$$\gamma(T) = \frac{C_p + [1 - R(T)] * C_d}{\int_{-\infty}^T R(t) dt} \quad (7)$$

$$\gamma_c = \frac{C_p + C_d}{MTBF} \quad (8)$$

- C_p : coût du renouvellement préventif par pièce, il comprend le coût de la pièce neuve et celui de la main-d'œuvre
- C_d : coût d'une défaillance en service, il comprend le coût de la pièce neuve, de la main-d'œuvre, ceux entraînés par les pertes de production et de la mise en place d'une solution compensatoire
- $\gamma(T)$: coût moyen par unité de temps d'une maintenance préventive
- γ_c : coût moyen par unité de temps d'une maintenance corrective

Modèle non simplifié

L'expression du coût moyen de maintenance par unité de fonctionnement est donnée par relation 9 [LYONNET, 2000] :

$$\gamma(T) = \frac{C_p * R(T) + [1 - R(T)] * C_d}{\int_{-\infty}^T R(t) dt} \quad (9)$$

Renouvellement périodique 'as good as new'

Le coût moyen de maintenance par unité de fonctionnement est calculé à partir de la formule 10 :

$$\gamma(T) = \frac{C_p + [1 - R(T)] * C_d}{T} \quad (10)$$

Renouvellement périodique 'as bad as old'

Dans le cas présent, le coût de défaillance en service est minimisé par rapport à une remise à neuf ($C_{dmin} < C_d$). Le niveau de fiabilité après réparation n'est pas celui du neuf mais garde le même niveau que celui qu'il avait avant la défaillance [BELMOKHTAR et al., 2002 ; LYONNET, 2000].

$$\gamma(T) = \frac{C_p + [\int_0^T \lambda(t) dt] * C_{dmin}}{T} \quad (11)$$

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} * \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (12)$$

Renouvellement collectif

Les éléments cassés ne sont remplacés qu'à une période fixe (T_p).
Si n est le nombre d'éléments maintenus, le coût par unité de temps pour l'ensemble est :

$$\gamma(T) = \frac{n * C_d * H(T) + n * C_p}{T} \tag{13}$$

$$H(T) = \int_0^T \lambda(t) dt \tag{14}$$

ABAQUES DE KELLY

Une condition pour pratiquer de la maintenance préventive au temps t est d'avoir $\gamma(t) < \gamma_c$.

L'étude de la fonction $\gamma(t)$ permet de décider si on doit faire du préventif et déterminer le temps T_0 optimum du changement ou non.

De cette étude, il a été trouvé que [LYONNET, 2000] :

- Si le taux de défaillance $\lambda(t)$ est croissant, on a un seul minimum T_0 (temps optimum)

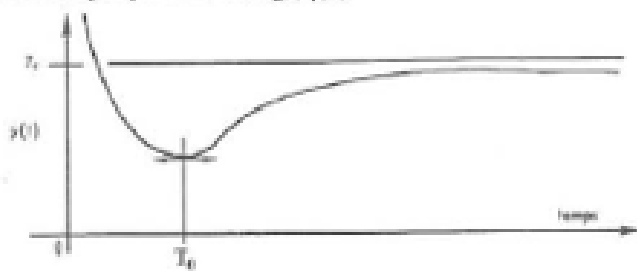


Figure 2 | Courbe $\gamma = \gamma(T)$ pour $\beta > 1$

- Si $\lambda(t)$ est constant, alors il n'y a pas de minimum. Il faut donc faire de la maintenance corrective.

Dans le cas général d'une loi de Weibull avec $\beta > 1$, on obtient la

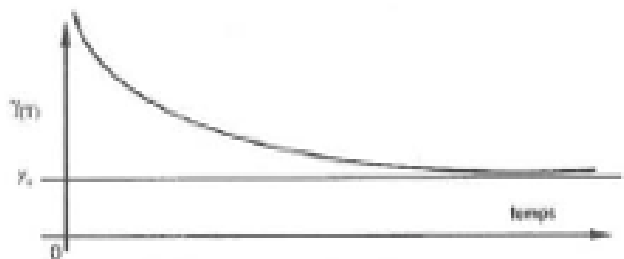


Figure 3 | Courbe $\gamma = \gamma(T)$ pour $\beta = 1$

courbe à la figure 2 pour $\gamma(T)$ [LYONNET, 2000] :

Dans le cas où $\beta = 1$, il n'y a pas d'optimum, donc pas de changement préventif à envisager, figure 3 [LYONNET, 2000 ; MAGHSOODLOO et al., 2014].

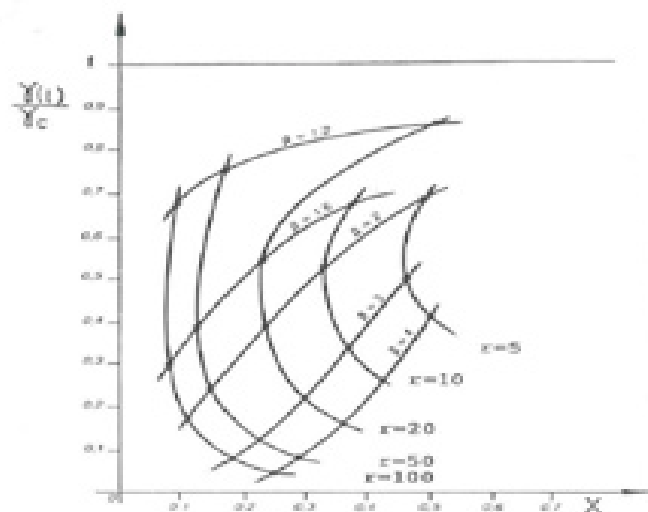


Figure 4 | Abaque de Kelly

Les abaques de Kelly, figure 4, donnent les paramètres optima (temps, coût,...) en minimisant l'équation $\frac{\gamma}{\gamma_c}(x)$. Ces abaques ont

été étudiés pour différentes lois de Weibull et différents rapports $r = C_d / C_p$.

RECHERCHE DE L'OPTIMUM POUR LE RENOUVELLEMENT PRÉVENTIF

En posant

$$X = \frac{T}{\eta}$$

$$r = \frac{C_d}{C_p}$$

et

$$S = \frac{\gamma}{\eta}$$

les formules (1), (3), (5), (6), (7), (8), (9), (10), (13) et (14) conduisent aux relations ci-dessous :

$$\frac{\gamma}{\gamma_c}(x) = \frac{1+r \cdot [1 - e^{-(x-s)^\beta}]}{\int_s^x e^{-(x-s)^\beta} dx} \cdot \frac{s + \Gamma(1 + \frac{1}{\beta})}{1 + \Gamma} \tag{15}$$

pour le renouvellement à âge fixe, approche simplifiée

$$\frac{\gamma}{\gamma_c}(x) = \frac{e^{-(x-s)^\beta} + r \cdot [1 - e^{-(x-s)^\beta}]}{\int_s^x e^{-(x-s)^\beta} dx} \cdot \frac{s + \Gamma(1 + \frac{1}{\beta})}{1 + \Gamma} \tag{16}$$

pour le renouvellement à âge fixe, approche non simplifiée

$$\frac{\gamma}{\gamma_c}(x) = \frac{1+r \cdot [1 - e^{-(x-s)^\beta}]}{x} \cdot \frac{s + \Gamma(1 + \frac{1}{\beta})}{1 + \Gamma} \tag{17}$$

pour le renouvellement périodique 'as good as new'

$$\frac{\gamma}{\gamma_c}(x) = \frac{1+r \cdot (x-s)^\beta}{x} \cdot \frac{s + \Gamma(1 + \frac{1}{\beta})}{1 + \Gamma} \tag{18}$$

pour le renouvellement collectif.

En minimisant l'équation

$$\frac{\gamma}{\gamma_c}(x)$$

, x_0 est trouvé et par la suite :

$$\frac{\gamma}{\gamma_c}(x_0)$$

Ceci permet de calculer le temps optimum T_0 et le coût préventif optimum γ_p .

Dans ce qui suit, il n'a pas été traité le cas du renouvellement périodique 'as bad as old' car ceci est retrouvé à partir l'expression du renouvellement collectif en remplaçant le coût C_d par C_{dmin} .

CONCEPTION DU PROGRAMME

Le programme est écrit en matlab. Une interface graphique pour utilisateur a été conçue en vue de protéger le code source (figure 5).

La fenêtre du GUI présente deux parties :

1. La partie gauche comprenant:

- quatre boutons radio pour le type de renouvellement :
 - renouvellement à âge fixe approche simplifiée de Kelly ;
 - renouvellement à âge fixe approche non simplifiée ;
 - renouvellement périodique et
 - renouvellement collectif ;
- deux zones texte éditable pour entrée des paramètres économiques: C_p et C_d ;
- une zone texte éditable pour entrée de l'unité pour C_p et C_d (unité monétaire);
- trois zones texte éditable pour entrée des paramètres de la loi de Weibull: β , γ et η ;
- une zone texte éditable pour entrée de l'unité pour γ et η (unité de temps) ;
- un bouton 'réinitialiser' pour effacer toutes les valeurs entrées et pointer sur le premier type de renouvellement;
- un bouton 'calculer' pour confirmer les valeurs entrées, calculer et afficher les résultats et les courbes;
- une zone de notification

2. La partie droite pour les résultats, courbes et notifications:

- le temps optimum de remplacement T_o
- le coût moyen de maintenance préventive γ_p
- le coût moyen de maintenance corrective γ_c
- la fiabilité R
- le gain relatif de maintenance préventive γ
- les courbes du rapport, $\frac{\gamma}{\gamma_c}(x)$ tout en pointant son

minimum, et de la fiabilité $R(x)$

- une zone de notification
- Les valeurs de C_p , C_d , β , γ et η doivent toutes être numériques, connues et obligatoirement entrées dans leurs cases respectives. L'entrée des unités est facultative

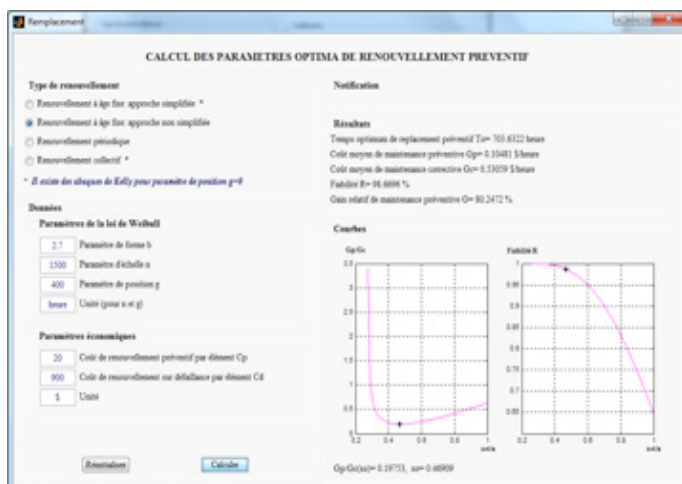


Figure 5| Affichage des résultats

tive (19)

- Le programme a été conçu pour les conditions suivantes: $1 < \beta \leq 4$, $\eta > 0$ et $\eta > \gamma$, $C_p > 0$, $C_d > 0$ et $C_d > C_p$ (20)

En cas de non-respect d'une ou de deux conditions (19) et (20), le programme ne fait aucun calcul et affiche un message correspondant dans la zone de notification de droite (figure 6).



Figure 6| Affichage en cas de donnée manquant

COMPARAISON DES RÉSULTATS AUX AUTRES CALCULS FAITS

Le programme permet de calculer les paramètres du renouvellement préventif pour quatre cas (approche simplifiée de Kelly, approche non simplifiée, renouvellement périodique et renouvellement collectif).

=> Cas $\gamma = 0$

LYONNET [2000] donne un exemple de calcul du temps et du coût optimum avec $C_p = 10F$, $C_d = 500F$, $\gamma = 0$, $\eta = 300h$, $\beta = 2$.

Les résultats trouvés sont: $T_o = 44.6 h$ et $\gamma_p = 0.47 F/h$

En utilisant notre programme de calcul, nous obtenons les valeurs dans le tableau 1.

Tableau 1| Exemple pour $\gamma = 0$

Type de renouvellement	To [h]	γ_p [F/h]	γ_c [F/h]	γ [%]
Age fixe: approche simplifiée	42.5010	0.47219	1.9182	75.3842
Age fixe: approche non simplifiée	42.9266	0.46746	1.9182	75.6308
Renouvellement périodique	43.0865	0.46901	1.9182	75.5501
Renouvellement collectif	42.4298	0.47140	1.9182	75.4252

Dans cet exemple les gains relatifs se rapprochent pour tous les quatre cas, de même pour T_o et γ_p .

=> Cas $\gamma > 0$

$C_p = 10\$$, $C_d = 400\$$, $\gamma = 300h$, $\eta = 500h$, $\beta = 1.5$ [LYONNET, 2000]. Résultats trouvés: $T_o = 302.6 h$, $\gamma_p = 0.00334\$/h$

En utilisant le programme de calcul, pour chacun des cas, on obtient les valeurs dans le tableau 2:

de renouvellements périodique et collectif, le coût moyen de maintenance préventive est faible comparativement aux renouvellements à âge fixe.

Dans cet exemple le gain relatif est meilleur pour les cas de renouvellements périodique et collectif, le coût moyen de maintenance préventive est faible comparativement aux renouvellements à âge fixe.

Tableau 2| Exemple pour $\gamma > 0$

Type de renouvellement	To [h]	γ_p [\$/h]	γ_c [\$/h]	γ [%]
Age fixe: approche simplifiée	368.3184	0.44350	0.5456	18.7113
Age fixe: approche non simplifiée	369.4869	0.43610	0.5456	20.0649
Renouvellement périodique	300.3853	0.03332	0.5456	93.8939
Renouvellement collectif	300.3853	0.03332	0.5456	93.8939

=> Cas $\gamma < 0$

$C_p = 20, C_d = 400, \gamma = -1, \eta = 4, \beta = 3$

Le temps calculé est $T_o = 0.17082, \gamma_p = 25.70377$

En utilisant le programme de calcul, on obtient les valeurs dans le **tableau 3**:

Tableau 3| Exemple pour $\gamma < 0$

Type de renouvellement	To	γ_p	γ_c	γ [%]
Age fixe: approche simplifiée	0.1708	25.7031	163.3022	84.2604
Age fixe: approche non simplifiée	0.1911	25.2702	163.3022	84.5255
Renouvellement périodique	1.0150	66.9952	163.3022	58.9747
Renouvellement collectif	0.9297	69.8189	163.3022	57.2456

Dans cet exemple γ est meilleur pour les cas de renouvellement à âge fixe, γ_p faible comparativement aux renouvellements périodique et collectif.

Concernant le cas $\gamma < 0$, la courbe

$$\frac{\gamma}{\gamma_c}(x)$$

présente une discontinuité (**figure 7**) au point $x=0$ pour les renouvellements périodique et collectif compte tenu de la présence de 'x' au dénominateur des équations (17) et (18).

Figure 7| Cas $\gamma < 0$ pour renouvellement périodique et collectif

CONCLUSION

La connaissance de la loi de fiabilité d'un composant (loi de Weibull), principalement son paramètre de forme β et des paramètres économiques est nécessaire à la détermination des

paramètres optima économiques de remplacement. Seule une valeur de paramètre de forme supérieure à l'unité justifie un éventuel changement. Quand $\beta \leq 1$, aucun remplacement préventif, ni entretien courant n'est justifié.

Par contre si ($\beta > 1$ et $r > 2$) un entretien préventif peut être envisagé et après une étude d'optimisation.

Comme nous l'avons souligné tout au long de ce travail, l'utilisation des abaques de Kelly est limitée au seul cas de la loi de Weibull à deux paramètres. Le programme présenté en permet l'extension pour toute valeur de paramètre de position et traite quatre différents cas de renouvellement. L'utilisateur pourrait donc, par une comparaison des paramètres, déterminer lequel des types est le mieux adapté pour son équipement en vue d'en améliorer la rentabilité.

CODE SOURCE : PROGRAMME DE CALCUL DES PARAMETRES OPTIMA DE RENOUELEMENT PREVENTIF (voir **Suppléments**).

RÉSUMÉ

Les abaques de Kelly, tracés pour une fiabilité suivant la loi de Weibull à deux paramètres (paramètre de position nul), facilitent le calcul des paramètres optima du renouvellement en maintenance préventive systématique. Il suffit juste de connaître les données économiques et le paramètre de forme de la répartition de Weibull pour trouver l'optimum sans passer par des calculs complexes.

Cependant le paramètre de position correspond à un décalage d'origine de temps et une étude de fiabilité peut être lancée sur des équipements ou composants déjà utilisés. Dans ce cas, ce paramètre n'est pas nécessairement nul. Le fait que la maintenance préventive systématique engendre un alourdissement de coûts, si elle est mal gérée, nous amène à proposer une extension des abaques de Kelly. Un programme de calcul des paramètres optima du renouvellement préventif (temps, coût préventif, coût correctif, ...) pour un matériel dont la fiabilité suit la loi de Weibull pour toute valeur du facteur de position est présenté. Le programme est écrit en matlab et une interface graphique pour utilisateur (GUI) a été élaborée en vue de protéger le code source.

Mots clés

Kelly, renouvellement, remplacement, coût, temps, gain, maintenance, abaque, Weibull, matlab, préventif

REFERENCES ET NOTES

- AL-NAJJOR B., KRANTZ M. AND KANS M. [2002], *Maintenance costs savings and benefits in manufacturing*. 4th International conference on Quality, Reliability and Maintenance. QRM 2002. London, UK. Professional Engineering Publishing Limited, pp. 7-10.
- BALAKRISHNAN N. AND RAO C.R. [2001], *Handbook of Statistics. Volume 20*. Elsevier Science B.V, United Kingdom
- BEEBE R.S. [2004]. *Predictive maintenance of pumps using condition monitoring*. Elsevier Inc. Oxford OX5 1GB, United Kingdom
- BELMOKHTAR O, LAMRAOUI T. AND OUABDESSELAM A. [2002], *Maintenance policy for an element plane reactor*. 4th International conference on Quality, Reliability and Maintenance. QRM 2002 London, UK. Professional Engineering Publishing Limited, pp. 125-128.
- BLOCH H. P. [1998], *Practical Machinery Management for Process Plants. Volume 1*. Elsevier Inc., Oxford OX5 1GB, United Kingdom
- BRUNET Y. [2009], *Problématiques du stockage d'énergie*. Lavoisier, 75008 Paris
- COPELAND K A.F. [2003], Coffin M. and R. Nelson P. *Introductory statistics for engineering experimentation*, Elsevier academic press USA
- DUCHEMIN G. [2017], *Maintenance des machines et des moteurs*. Techniques de l'Ingénieur. Saint-Denis, Cedex
- FAYÇAL B., FAROUK Y., MOHAMMED B., SARI Y. [2015], *Méta heuristiques pour l'optimisation des services de maintenance et de production sous*

des contraintes de ressources consommables. Xème Conférence Internationale: Conception et production intégrées. Tanger, Maroc , HAL id : hal-01260677, pp. 1-11.

- FRANCASTEL J. [2009]**, *Ingénierie de la maintenance. De la conception à l'exploitation d'un bien*. 2è édition. L'usine nouvelle. Dunod, Paris
- GHARBI A., BEAUCHAMP Y., ANDRIAMAHAROSOA S. [2001]**, 3è Conférence Francophone de Modélisation et Simulation « Conception, Analyse et Gestion des Systèmes Industriels » MOSIM'01 – du 25 au 27 avril 2001 – Troyes (France)., pp. 707-803.
- IEEE [1990]**, Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE Standard Computer Dictionary. New York
- JIANG P., XING Y., JIA X., GUO B. [2015]**, *Weibull failure probability estimation based on zero-failure data. Mathematical problems in engineering. Article ID 681232*, Vol. 2015, pp.1-8. DOI: 10.1155/2015/681232.
- KUMAR U.D., CROCKER J., KNEZEVIC J., EL-HARAM M. [2016]**, *Reliability, maintenance, and logistic support*. Springer, Boston, MA
- LANTERNIER B., CHARPENTIER D., LYONNET P. [2006]**, *Modélisation de taux de défaillance en mécanique. Colloque de maîtrise des risques et sûreté de fonctionnement «Risques et performances»*, Lille, France.
- LEI Y. [2017]**, *Intelligent fault diagnosis and remaining useful life prediction of rotating machinery*. Elsevier Inc. Oxford OX5 1GB, United Kingdom
- LYONNET P. [2000]**, *La maintenance. Mathématiques et méthodes*. 4è édition. Editions TEC & DOC., Paris Cedex
- MACISAAC B. AND LANGTON R. [2011]**, *Gas turbine propulsion systems*. A John Wiley and Sons, Ltd., Publication. United Kingdom
- MAGHSOODLOO S., HELVACI D. [2014]**, *Renewal and Renewal-Intensity functions with minimal repair. Journal of Quality and Reliability Engineering, Article ID 857437*, Vol. 2014, pp.1-10. DOI: 10.1155/2014/857438.
- MC KENNA T. AND OLIVERSON R. [2008]**, *Glossary of reliability and maintenance*. Gulf Publishing Company, Houston, Texas
- SALTOĞLU R., HUMAIRA N. AND İNALHAN G. [2016]**, *Aircraft scheduled airframe maintenance and downtime integrated cost model. Advances in Operations Research, Article ID 2576825*, Vol. 2016, pp.1-12. DOI: 10.1155/2016/2576825.
- SAVSAR M. [2013]**, *Analysis and scheduling of maintenance operations for a chain of gas stations. Journal of Industrial Engineering, Article ID 278546*, Vol. 2013, pp.1-7. DOI: 10.1155/2013/278546.
- TAYLOR Z. AND RANGANATHAN S. [2013]**, *Designing High Availability Systems USA*. IEEE Press Editorial Board
- THE MATHWORKS, INC. [2000]** *Creating Graphical User Interfaces. R2014b*. 3 Apple Hill Drive Natick, MA 01760-2098, 2000–2014



This work is in open access, licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons license, unless indicated otherwise in the credit line; if the material is not included under the Creative Commons license, users will need to obtain permission from the license holder to reproduce the material. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>