

MAINTENANCE INDUSTRIELLE

Fiabilité : le taux d'avarie des

JEAN BUFFERNE [1]

Le nouvel ouvrage de l'auteur, « Fiabilité des équipements », permet d'aider les responsables maintenance et les techniciens à comprendre, exploiter ou construire les données de fiabilité des équipements dont ils ont la responsabilité.

En voici un extrait, précédé d'une introduction de l'auteur.

Lorsqu'on aborde les notions de fiabilité, on s'appuie très souvent sur la courbe « en baignoire » ou courbe de durée de vie, représentant l'évolution du taux d'avarie d'un élément en fonction de son temps d'utilisation. Cela, en se référant à la courbe de mortalité des humains en fonction de leur âge. Mais on commet une erreur en supposant que la vie d'un élément mécanique, électrique, pneumatique ou électronique peut être représentée comme celle des humains par trois périodes successives : infantile, accidentelle, de vieillissement. Les essais sur un élément peuvent faire apparaître ces différents taux d'avarie (défaillances infantiles, fortuites, dues au vieillissement), mais il s'agit de comportements et non de périodes successives. L'élément matériel peut présenter un seul, deux ou trois de ces comportements.

Lorsqu'on présente la courbe du taux de mortalité des humains, on omet de préciser – et il en est de même pour les matériels – que durant la période accidentelle le MTBF (temps moyen de bon fonctionnement) ou le MTTF (un mort n'étant pas réparable !) est de l'ordre de 4 000 ans. Ce qui n'a pas beaucoup de sens autre que mathématique. Cela veut dire que si nous ne vieillissons pas, nous aurions un risque de mort de $2,5 \times 10^{-4}$ par an. Le *si* est important !

De même, annoncer pour un composant un MTBF de 50 000 heures suppose que celui-ci suit uniquement une loi de fiabilité exponentielle (ce qui peut ne pas être le cas). Cela signifie aussi que la probabilité d'arriver à cette durée n'est que de 36,8 %. Par contre, si ce composant suit vraiment une loi exponentielle, il présente, tout au long de sa vie, une probabilité de 20×10^{-6} défaillance par heure de fonctionnement.

[1] Ingénieur-conseil et instructeur TPM (Total Productive Maintenance) certifié JIPM (Japan Institute of Plant Maintenance).

[2] Le hasard a été défini par Émile Borel (1871-1956) comme le résultat de la présence simultanée de trois conditions : un grand nombre de causes, indépendantes les unes des autres, aucune d'entre elles n'étant prépondérante. Le hasard est le résultat de la combinaison de probabilités.

 Mots-clés

maintenance,
outil et méthode,
processus

On verra que livres, études prévisionnelles de fiabilité, bases de données mais aussi constructeurs supposent que les composants étudiés sont dans la partie horizontale, de taux d'avarie constant, de la courbe en baignoire (période de vie utile, de pannes fortuites ou de pannes accidentelles), les autres phénomènes n'étant pas pris en compte. Pour les normes relatives aux systèmes instrumentés de sécurité fonctionnelle (normes CEI 61508, 61511, etc.), c'est l'industriel utilisateur qui doit justifier un taux d'avarie constant durant un temps déterminé.

Cette hypothèse est nécessaire pour faciliter les calculs prévisionnels de fiabilité, mais elle suppose que l'on connaisse le comportement réel des composants pour éviter les phénomènes de vieillissement, en réalisant en particulier une maintenance préventive. On peut faire toutes les hypothèses que l'on veut à condition de connaître leurs attendus et leurs conditions d'application.

Fiabilité et théorie des contraintes

On peut représenter la fiabilité d'un composant comme sa capacité (due à ses caractéristiques) à résister à certaines contraintes relatives aux conditions :

- d'utilisation : charge, température, vibrations, humidité ;
- induites : dissipation d'énergie, vibrations auto-induites, usure, etc.

Si caractéristiques et contraintes sont des variables aléatoires (donc dues au hasard [2]) et indépendantes, la fiabilité est la probabilité que la résistance soit supérieure à toutes les valeurs possibles de contraintes. Elle est la résultante des distributions aléatoires des caractéristiques et des contraintes subies.

Les défaillances résultent de la coïncidence aléatoire de pics de contrainte et de creux de résistance **1**. Elles résultent d'une accumulation aléatoire, donc imprévisible et sans signe précurseur, de contraintes qui dépassent les limites que le composant peut supporter. Ce processus correspond au comportement dit de *vie utile*.

Deux phénomènes viennent modifier ce comportement :

- Un lot de composants peut contenir un petit nombre d'éléments ayant des caractéristiques plus faibles que les autres (pourcentage de défauts admis dans une fabrication, qualité du montage) et qui lâchent plus rapidement. Cela conduit à la *période infantile*. Leur remplacement au fur et à mesure des défaillances

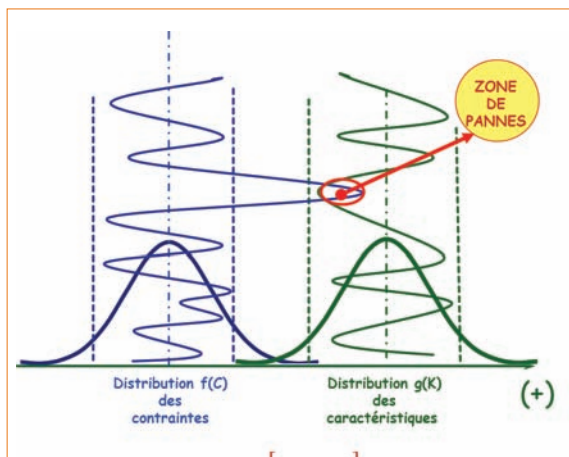
équipements est-il constant ?

permet d'atteindre les caractéristiques nominales de la période de vie utile. Le déverminage ou le rodage peut éliminer les éléments faibles avant la période d'exploitation.

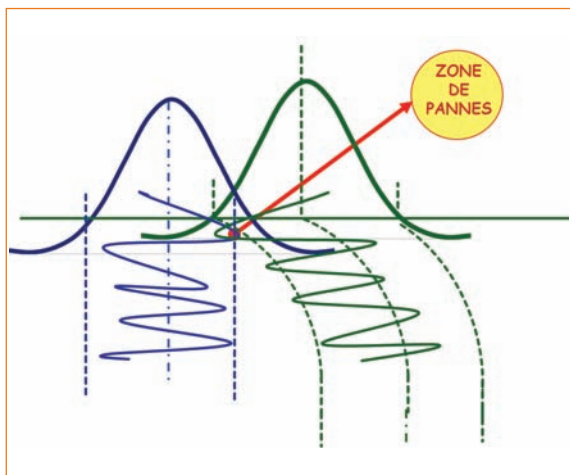
• Des phénomènes physiques, chimiques, mécaniques peuvent réduire progressivement la résistance des composants **2**. On se situera alors dans la *période de vieillissement*.

Ces trois périodes, infantiles, vie utile, vieillissement, sont souvent représentées par une image d'Épinal dite *courbe en baignoire* ou *courbe de durée de vie*.

Si $g(K)$ est la répartition des caractéristiques K du composant, et $f(C)$ la répartition des contraintes C , la fiabilité est la probabilité que la résistance soit supé-



1 L'origine des défaillances



2 L'impact du vieillissement

rieure à toutes les valeurs possibles de cette contrainte ; elle peut s'exprimer par :

$$R = \int_{-\infty}^{+\infty} f(C) \cdot \left[\int_c^{\infty} g(K) \cdot dK \right] \cdot dC$$

Cette équation, qui dépasse le cadre de cette étude, mérite d'être mentionnée car elle est la base des calculs prévisionnels de fiabilité.

Remarquons que dans cette présentation de la fiabilité nous prenons en compte uniquement des phénomènes aléatoires (en grand nombre, indépendants, sans caractère prépondérant) dus à des causes :

- humaines : étourderies, mauvais jugement de l'état des pièces lors des dépannages ou des contrôles préventifs, erreurs ou imprécisions de montage, de réglage ;
- matérielles : non conformité, dispersion des caractéristiques, erreurs de montage, erreurs de conception ;
- environnementales : variabilité des conditions thermiques, chimiques, électriques, variabilité des matières premières, etc. ;
- managériales : imprécision des standards d'entretien, des critères de contrôle de maintenance conditionnelle, anomalies non détectées, réparations négligées ou incomplètes, dépassement des capacités nominales.

Il faut garder à l'esprit que le hasard absolu n'existe pas, il est la traduction d'un manque de connaissance ou de moyens d'analyse systémique des différents paramètres de faible influence.

La fiabilité ne s'intéresse qu'à des causes aléatoires, mais il existe des causes spéciales [voir J. Bufferne, « Performance et maintenance des équipements : Tout est déterminé dès la conception ! », Technologie, n° 175, sept.-oct. 2011] ou systématiques qui ne peuvent être éliminées que par une modification de la conception, de la construction, des conditions d'utilisation. Elles demeurent les causes majeures de défaillance ou d'incident.

L'hypothèse de la période de vie utile

Les tableaux en encadré précisent dans quels cas les taux d'avarie de composants et d'ensembles de plusieurs composants (désignés par le terme d'*éléments*) sont constants ou peuvent être assimilés à des constantes.

Dans le cas d'éléments, on notera qu'il s'agit du taux moyen d'avarie équivalent calculé par application de la loi de Drenick prenant en compte le taux d'avarie et la loi de dégradation de chaque composant.

Ce qui montre que le taux d'avarie d'un élément et par conséquent d'un équipement (constitué lui-même de différents éléments) peut être considéré comme constant pour une durée et des conditions de maintenance bien définies.

Le taux moyen d'avarie global équivalent d'un équipement est fonction de la loi de fiabilité et de la politique de maintenance adoptée pour chacun de ses composants. Il permet à l'utilisateur de réaliser des prévisions relatives au taux de défaillance global de l'équipement et par conséquent à sa disponibilité. Ce taux peut être fourni par les constructeurs ou par l'analyse du retour d'expérience du fonctionnement de l'équipement.

Pour un responsable maintenance qui a pour objectif d'améliorer la disponibilité des équipements, d'optimiser les coûts de maintenance et la gestion du stock de pièces de rechange, ce taux est un indicateur de résultat, mais sa connaissance n'est pas suffisante ; il est *impératif* qu'il connaisse la loi de fiabilité des composants critiques pour :

- choisir les méthodes de maintenance à appliquer ;
- fixer la périodicité de la maintenance préventive lorsque celle-ci est nécessaire ;
- prévoir les consommations de ces divers composants et donc définir les paramètres de gestion de stock. ■

EN RAYON

*Fiabilité des équipements :
Application à la maintenance industrielle*

Dans l'industrie, il n'est pas possible de produire en « juste-à-temps » ou plus simplement de respecter les délais si l'on ne peut prévoir de manière réaliste la disponibilité et la performance des moyens de production. La conception des équipements détermine leur fiabilité intrinsèque, mais aussi les conditions de leur entretien et de leur maintenance. Pourtant, les responsables de la maintenance disposent rarement des données de fiabilité des nouveaux équipements. Cet ouvrage permet de mieux définir une politique de développement et d'amélioration de la maintenance, et donc d'en faire baisser le coût.

Éditeur : IFEAS
<http://www.ifeas.eu>

Pour se le procurer :
www.thebookedition.com/fiabilite-des-equipements-jean-bufferne-p-98007.html



Cas où le taux d'avarie est constant ou assimilé à une constante

Paramètres et caractéristiques

	Vie utile	Vieillessement
Équation de Weibull	$\beta = 1 \Rightarrow$ loi exponentielle	$1 < \beta < 4$ $\beta = 2$ loi log-normale ; $\beta = 3,45$ loi normale Assimilation à une loi normale pour $\beta \geq 3$
Taux d'avarie λ	$\lambda = c^{te}$. Probabilité de défaillance par heure ou fréquence de défaillance ⁽¹⁾ $R(t)$ = fonction de la durée de la mission	$\lambda = f(t)$ $R(t)$ fonction de l'âge du composant.
Temps moyen de bon fonctionnement Moyenne des temps de bon fonctionnement	$MTBF = \int_0^t t \cdot f(t) \cdot dt$ avec $f(t)$ = densité de fiabilité = $\frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$ $M = \int_0^t R(t) \cdot dt$	
	Pour t variant de 0 à ∞ , $MTBF = M$ $MTBF = 1 / \lambda = c^{te}$	$MTBF = f(t)$ $MTBF_{vieillessement} \ll MTBF_{vie\ utile}$
Type de défaillances	Pannes fortuites, sans signe précurseur	Dégradation lente des caractéristiques avec signes avant-coureurs
Maintenance préventive	Maintenance conditionnelle généralement impossible	Périodicité fonction du risque de défaillance accepté
	Maintenance systématique inutile sauf : si vie utile interrompue par phénomène de vieillissement ⁽²⁾ si plusieurs composants montés en parallèle ⁽³⁾	

Cas où le taux d'avarie est constant ou assimilé à une constante (suite)

Conditions d'assimilation à une loi exponentielle $\beta = 1$, taux d'avarie = constante

Hypothèses	Conditions de réalisation	Remarques
Suppression de la période infantile	Exigences qualité fabrication, déverminage, utilisation de composants déjà utilisés, déclasser des composants	Ne pas oublier l'impact de la qualité du montage de ces composants
Composants à comportement exponentiel (vie utile $\beta = 1$) ou équipements constitués de ces composants		
Composants dont la période de vie utile est interrompue par un phénomène de vieillissement	Remplacer systématiquement les composants afin que : $F_{\text{vieillessement}}(\text{âge du composant}) \leq F_{\text{utile}}(\text{durée mission})$	Il faut connaître la loi de vieillissement pour respecter cette condition et prévoir le stock de pièces de rechange
Composants à comportement exponentiel montés en série	$\lambda_{\text{sys}} = \sum \lambda_i$	
Composants à comportement exponentiel montés en parallèle $\lambda_{\text{système}} = f(t) \neq c^{te}$ (3)	<i>Redondance active</i> : pour $t \rightarrow \infty$ $\lambda_{\text{système}} \rightarrow \text{limite} = 1 / M$ <i>Redondance passive</i> : contrôle systématique du bon fonctionnement des composants avant chaque mission (4)	La périodicité des tests est un élément essentiel dans la sécurité fonctionnelle des systèmes E/E/PE (électriques, électroniques, électroniques programmables)
Composants à comportement quelconque ($1 < \beta < 4$) ou éléments constitués d'un grand nombre de ces composants. Loi de Drenick n composants à comportement exponentiel de taux d'avarie λ_a , et m composants en mode de vieillissement ayant une moyenne de temps de bon fonctionnement M_j		
$\lambda_{\text{sys}}(t) = \sum_{i=1}^{i=n} \lambda_{a_i} + \sum_{j=1}^{j=m} \frac{1}{M_j}$		
Composants identiques de $\beta > 1$ remplacés au fur et à mesure de leurs défaillances	$\lambda_{\text{sys}} = 1 / M$	La stabilisation a lieu après une période de fluctuation importante à $T = M^2 / (3 \sigma)$
Composants différents de $\beta > 1$ remplacés au fur et à mesure de leurs défaillances	$\lambda_{\text{sys}}(t) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{M_i}$ M_i , moyenne des temps de bon fonctionnement du composant i	Stabilisation après une période de fluctuation importante
Mode de vieillissement Application d'une maintenance préventive Composants remplacés systématiquement suivant une périodicité T_0	$\lambda_{\text{sys}} = \lambda_{\text{prév}} + \lambda_{\text{déf}}$ $\lambda_{\text{prév}} = \frac{1}{M(T_0)} \cdot R(T_0)$ avec $M(T_0) = \int_0^{T_0} R(t) \cdot dt$ $\lambda_{\text{déf}} = [1 / M(T_0)] \cdot [1 - R(T_0)]$	Il faut connaître la loi de vieillissement de chaque composant pour définir la périodicité de remplacement systématique
Composants $\beta > 1$ utilisés durant une période très courte	En début de période de vie, on peut considérer que $\lambda = c^{te}$ durant un court intervalle de temps	Attention : $R_{\text{système}} = \prod R_i$ Si grand nombre de composants, la probabilité de pannes dues au vieillissement peut être importante

(1) Probabilité de défaillance représentée par $F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$. Or pour $x < 0,05$ on peut considérer que $1 - e^{-x} \approx x$, d'où $F(t) \approx \lambda t$. D'où probabilité de défaillance durant l'unité de temps $\approx \lambda$. Pour un échantillon de grandeur N , le nombre de défaillants durant le temps t est : $K = N \cdot F(t) = N(1 - e^{-\lambda t}) \approx N \cdot \lambda \cdot t$. D'où fréquence de panne d'un composant = $K / N \cdot t = \lambda$.

(2) Exemples : leds, transistors MOS, générateurs d'ultrasons, etc.

(3) Si 2 composants de même $\lambda = c^{te}$ montés en parallèle. $R_{\text{sys}} = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^2 = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}$

$$\lambda_{\text{sys}} = \frac{dR}{dt} \cdot \frac{1}{R(t)} = \frac{2 \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda t} - 2 \cdot \lambda \cdot e^{-2\lambda t}}{2 \cdot \lambda \cdot e^{-\lambda t} - \lambda \cdot e^{-2\lambda t}}$$

(4) Si 2 composants de même $\lambda = c^{te}$, en redondance passive le taux moyen de défaillance équivalent pour des tests effectués à une périodicité T_0 est :

$$\lambda_d = \frac{1 - R(T_0)}{m(T_0)} = \frac{1 - e^{-\lambda T_0} (2 - e^{-\lambda T_0})}{\frac{3}{2\lambda} - e^{-\lambda T_0} \left(\frac{2}{\lambda} - \frac{e^{-\lambda T_0}}{2\lambda} \right)}$$