

La fiabilité des équipements industriels

JEAN BUFFERNE^[1]

Les contraintes financières mais aussi de sûreté de fonctionnement obligent concepteurs et responsables maintenance à améliorer la fiabilité des équipements. Un responsable maintenance doit assurer la disponibilité des équipements au coût optimal. Il est nécessaire qu'il détermine la meilleure politique de prévention et de gestion des pièces de rechange. Il s'appuiera sur un retour d'expérience pour évaluer la fiabilité des équipements, tendre vers une prévention primaire (supprimer la cause première des défaillances), et diminuer ainsi les exigences de maintenance. Ce que les Japonais traduisent par la « prévention de la maintenance » ou le « sans-maintenance ».

La fiabilité d'un composant exprime la probabilité qu'il fonctionne correctement (sans défaillance) pendant un temps déterminé dans des conditions (que l'on appellera conditions de base) fixées de manière précise. Ce qui signifie que l'on doit définir sans ambiguïté :

- ce qu'est un fonctionnement correct ;
- la variable temps adoptée, c'est-à-dire l'unité d'usage la plus significative (heure, kilomètre, nombre de cycles...).

Cette définition de la fiabilité entraîne trois commentaires :

- L'expert maintenance, l'acheteur ou l'utilisateur d'un équipement sont tributaires de la fiabilité de celui-ci. Quel programme de maintenance adopter pour maintenir la disponibilité de cet équipement ? Quelle sera la durée de vie du bien que j'achète ? Quel sera ses coûts de maintenance (coût de

mots-clés

machine, maintenance, production

maintenance + coût de défaillance + coût des stocks de pièces de rechange) durant toute sa durée d'exploitation ? Quel est le risque d'incident ou d'accident encouru en utilisant cet appareil ?

- Dans l'industrie, la fonction maintenance existe parce que, les composants d'un équipement présentant une certaine probabilité de défaillance, il est nécessaire de prévenir celle-ci ou de réparer si l'on n'a pas su éviter la panne. Bien entendu, la fonction maintenance est aussi nécessaire parce que les exploitants « cassent » le matériel.

Maintenir c'est :

- dépanner parfois ;
- programmer, réaliser, améliorer les actions de prévention ;
- définir les paramètres de gestion des pièces de rechange ;
- exploiter les résultats de marche des équipements pour améliorer la politique de maintenance et diminuer ses coûts ;
- tendre vers le « sans-maintenance » ;

- budgéter les grosses révisions ou le renouvellement du matériel.

Pour assurer efficacement leur fonction, les responsables maintenance doivent posséder certaines notions de fiabilité.

- La définition de la fiabilité utilisée montre bien que son domaine englobe les probabilités, donc les statistiques et les mathématiques. La fiabilité peut faire l'objet de développements mathématiques « généreux » et en même temps d'hypothèses très simplificatrices. Dans mon livre *Fiabiliser les équipements industriels* (voir en encadré), j'ai voulu, à partir de quelques notions théoriques simples, fournir aux différents acteurs de l'entreprise (conception, ingénierie, BE, méthodes, qualité, production, maintenance) les éléments de base sur lesquels s'appuient les études de fiabilité.

Il faut aussi avoir conscience qu'un phénomène de fiabilité ne peut se réduire à l'application de lois statistiques. Une étude de fiabilité nécessite obligatoirement une expertise physique des organes ou composants étudiés et peut-être même de ceux qui leur sont liés. Apprendre la fiabilité, c'est déjà comprendre le besoin de qualité du retour d'expérience et savoir organiser la collecte des informations.

On doit aussi garder à l'esprit que les statistiques ne s'appliquent qu'à des phénomènes aléatoires, donc dus au hasard. Or un composant ou un équipement (on fera le distinguo entre ces deux notions)

[1] Ingénieur conseil (BFN Conseils).

[2] Les chiffres en gris entre crochets renvoient à la bibliographie.

font partie d'un système qui, suivant la théorie des variations telle qu'elle a été élaborée par Walter A. Shewhart, puis Joseph M. Juran et W. Edwards Deming, est soumis à un grand nombre de contraintes dont les causes appartiennent à deux familles différentes :

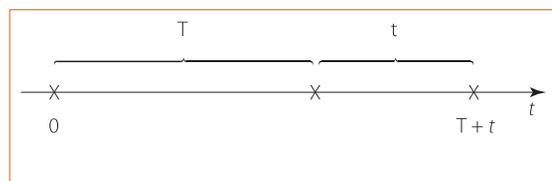
- **Causes communes ou aléatoires**
Dues au hasard, fréquentes, d'effet individuel faible, elles ont des origines nombreuses et variées, indépendantes les unes des autres et très difficilement identifiables, telles que le spectre des contraintes subies par un composant. Selon Émile Borel, un phénomène aléatoire est un phénomène résultant de la présence simultanée de trois conditions : un grand nombre de causes, indépendantes les unes des autres, aucune d'entre elles n'étant prépondérante.

- **Causes spéciales ou sporadiques ou assignables (secousses)**

Elles sont soudaines, peu fréquentes, issues d'événements passagers peu nombreux et identifiables : erreurs de manipulation, mauvais montage ou réglages, pièces défectueuses, dégradations forcées au sens de la TPM [1]²¹.

On dit qu'un système est dans un *état stable* ou *sous contrôle statistique* lorsqu'on a supprimé dans celui-ci toutes les causes spéciales.

On ne peut faire de prévisions rationnelles relatives à la fiabilité d'un équipement (performances, coûts de maintenance, programme de prévention, consommation de pièces de rechange) que s'il est dans un état stable ; comme le rappelle J. M. Juran, « ce n'est qu'après avoir établi un état de contrôle statistique que l'on peut s'engager vers l'amélioration d'un sys-



1 La durée de la mission pour le calcul de la fiabilité

tème » (W. E. Deming, *Hors de la crise*, trad. J.-M. Gogue, Economica).

Prenons l'exemple d'un roulement à billes. Dressons un inventaire non exhaustif des causes possibles de dégradations :

- Phénomène naturel de vieillissement (fatigue et usure)
- Mauvais montage (mode opératoire, mais aussi dégradation des tolérances, des états de surface après différents remplacements)
- Mauvaise lubrification
- Présence sporadique de contraintes trop sévères : vitesse, charge axiale, charge radiale (les constructeurs de

POUR ALLER PLUS LOIN



La performance économique d'une entreprise est dépendante de la fiabilité de son matériel. La compréhension de la fiabilité et de ses bases mathématiques est donc indispensable aux responsables maintenance pour mieux organiser en interne leur fonction ou mieux définir et négocier leurs contrats d'externalisation. Les concepteurs d'équipements doivent intégrer la fiabilité dans leurs projets.

Ce guide propose les bases d'une politique raisonnée de conception et de maintenance : choix des composants, type de maintenance, périodicité des

opérations de prévention, détermination des stocks de pièces de rechange, qualité du retour d'expérience, essentielle à l'amélioration des investissements.

Ingénierie, bureau d'études et méthodes maintenance trouveront dans cet ouvrage, de façon accessible, les outils mathématiques pour définir les conditions optimales d'exploitation des équipements (production et maintenance). Sans oublier les services après-vente (SAV) des constructeurs, qui ont l'obligation de fournir à leurs clients leurs préconisations en matière de maintenance, de prévention et de pièces de rechange.

L'auteur

Ingénieur EEIM, diplômé de l'ICG, instructeur TPM certifié par le Japan Institute of Plant Maintenance, il accompagne les entreprises dans leur démarche TPM et l'organisation de leur fonction maintenance. Il a une expérience de maintenance mais aussi de direction industrielle et de contrôle de gestion. Son ouvrage a été réalisé à partir des cours de maintenance-fiabilité qu'il assure à l'ISTP (Institut Supérieur des Techniques Productives) de Saint-Étienne.

Auteur : Jean Bufferne

Éditeur : Éditions d'organisation

Fiabiliser les équipements industriels

roulements à billes définissent une valeur L_{10} , durée de vie en millions de tours pour une fiabilité de 90 %, qui tient compte du type du roulement, de la charge qu'il supporte, de sa vitesse et de son mode de lubrification)

- Impuretés dans le roulement
- Dégradation d'un organe en relation avec lui (blocage, désalignement, casse, etc.)

- Fausse manœuvre sur l'équipement sur lequel il est installé
- Conditions ambiantes (température, vibrations, phénomènes électromagnétiques, etc.)

Seule la première de ces causes doit être prise en compte dans une étude de fiabilité. Si la cause première de défaillance n'a pas été enregistrée dans l'historique de l'équipement de

la GMAO (Gestion de Maintenance Assistée par Ordinateur), le technicien qui analysera l'historique du roulement pour construire un plan de prévention ou définir les paramètres de gestion de stock sera en droit de penser que l'on a confondu cet outil informatique avec une « Gestion de Miracle Assistée par Ordinateur ». Une meilleure connaissance théorique de la fiabilité devrait éviter aux responsables maintenance quelques erreurs :

- Croire qu'on ne peut pas estimer la fiabilité d'un équipement de production.

- Confondre le MTBF (*Mean Time Between Failure*), temps moyen de fonction entre pannes (paramètre d'une loi de fiabilité), et la moyenne arithmétique des durées de bon fonctionnement calculée à partir d'un historique sur lequel on a enregistré les durées de fonctionnement entre pannes (indicateur préconisé en gestion de maintenance). Rappelons que le MTBF au sens de la fiabilité est la moyenne arithmétique des différentes valeurs de la variable pondérées par leur probabilité d'occurrence (espérance mathématique).

- Penser qu'ils seront tranquilles durant un temps d'utilisation égale au MTBF (pour des composants électroniques, la fiabilité pour une durée d'utilisation égale au MTBF n'est que de 36,8 %, alors qu'elle est de 50 % pour un phénomène d'usure).

- Vouloir faire des prévisions (de périodicité de maintenance préventive, budgétaires, de consommation de pièces de rechange) pour des phénomènes qui ne sont pas sous contrôle statistique.

La loi de Weibull et les phénomènes de dégradation

Nous allons nous intéresser principalement au paramètre de forme β (voir « Les paramètres principaux de la fiabilité » ci-contre), car il est à la source de beaucoup de confusions en fiabilité.

La fiabilité peut s'exprimer par l'équation de Weibull :

$$R(t) = \exp - \left| \frac{t - \gamma}{\eta} \right|^\beta$$

Les paramètres principaux de la fiabilité

Soit un échantillon de N_0 composants. On relève durant l'essai le nombre $N_s(t)$ de survivants à l'instant t en supposant qu'à $t = 0$ tous les composants sont bons. L'étude statistique doit être développée en quatre étapes :

ÉTAPE 1

Le choix de l'estimateur et le calcul de son estimation (sa valeur)

En fiabilité, on adoptera trois estimateurs principaux :

- L'estimateur de la fiabilité au temps t :

$$\text{estim. } R(t) = \frac{N_s(t)}{N_0}$$

- L'estimateur du taux d'avarie à l'instant t :

$$\text{estim. } \lambda = \frac{N_s(t-1) - N_s(t)}{N_s(t-1)}$$

- L'estimateur du temps moyen de bon fonctionnement qui est la somme des temps de bon fonctionnement de chaque composant divisée par la grandeur de l'échantillon :

$$\text{estim. } T_{\text{moy}}(t) = \frac{\sum_0^t t \cdot [N_s(t-1) - N_s(t)]}{N_0}$$

Notons que les valeurs de ces trois estimateurs (estimations) sont fonction du temps.

ÉTAPE 2

La qualité de l'évaluation

En statistique – même si on l'oublie très souvent, en particulier dans les sondages –, on ne peut pas avancer un chiffre, mais seulement un intervalle de confiance pour le niveau de risque d'erreur que l'on s'est fixé.

ÉTAPE 3

La loi de distribution

C'est la loi mathématique suivant laquelle une estimation serait distribuée si les observations étaient répétées un grand nombre de fois. Pour nos estimateurs, les lois de distribution retenues sont :

- La fiabilité (pour laquelle la loi de Weibull viendra à notre secours) :

$$R(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(t) \cdot dt \right]$$

- Le taux d'avarie :

$$\lambda(t) = \frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR}{dt}$$

- Le MTBF :

$$M(t) = - \int_0^t R(t) \cdot dt$$

- La densité de défaillance :

$$f(t) = \frac{1}{N_0} \cdot \frac{dN_f}{dt} = \frac{dR}{dt}$$

dN_f étant le nombre de défaillances durant l'intervalle de temps dt , $f(t)$ est la probabilité de défaillance dans l'intervalle $[t, (t + dt)]$.

Remarque : Les abréviations $R(t)$ pour la fiabilité et $F(t)$ pour la probabilité de défaillance (certains ont créé le néologisme *défiabilité*) viennent de l'anglais *reliability* et *failure*.

ÉTAPE 4

Le test d'hypothèse nulle

Il permet d'affirmer au risque α de se tromper qu'il existe une différence significative entre les valeurs de l'échantillon et celles obtenues par application de la loi de distribution. Sinon on dira qu'il n'y a pas de raison de rejeter cette loi de distribution.

La loi de Weibull

Le mathématicien suédois Waloddi Weibull a défini en 1937 que la formule précédente de la fiabilité pouvait s'exprimer par :

$$R(t) = \exp - \left| \frac{t - \gamma}{\eta} \right|^\beta$$

Un tracé dit de Weibull réalisé à partir des couples (% de défaillances cumulées / temps) sur le papier spécial d'Allan Plait permet de déterminer les trois paramètres (β, λ, η) de la loi de Weibull :

- γ : paramètre d'origine des temps

Il prend en compte le fait que les composants étudiés sont neufs ou ont été déjà utilisés avant l'essai, avec ou sans remplacement.

Lorsqu'on n'a utilisé que des composants neufs, $\gamma = 0$. La formule de Weibull est dite à deux paramètres.

- β : paramètre de forme

Il définit le type de phénomène de dégradation en cause.

- η : paramètre d'échelle

Les valeurs de η et de β permettent de calculer le MTBF. Notons que cette valeur obtenue est indépendante du temps ; elle correspond à la somme de zéro à l'infini des temps de fonctionnement des composants étudiés.

Le paramètre de forme β varie de 0 à 4 et présente des valeurs particulières. L'équation de Weibull est applicable pour toutes les valeurs de β , et, notamment, elle peut se substituer aux cas particuliers des lois normales, log-normales et exponentielles (quelle chance de ne pas avoir à se poser trop de questions !).

$\beta < 1$

Le composant est dans sa période infantile ou de défauts de jeunesse. Certains composants d'un lot sont moins robustes que les autres (mauvaise fabrication, mauvais stockage, mauvais montage) ; leur défaillance se manifeste pour des contraintes plus faibles. Leur élimination et leur remplacement permettent de retrouver le taux d'avarie normal des composants.

$\beta = 1$

La période est dite de vie utile ou de panne fortuite. Les composants suivent une loi exponentielle :

$$R(t) = \exp - (t / \eta)$$

Pour cette loi exponentielle, on démontre que :

- Le MTBF est égal à η et égal à $1 / \lambda$. Donc, durant cette période, le taux d'avarie est constant. Par contre, pour un MTBF annoncé de 10 000 heures, on n'a que 36,8 % de chances d'arriver à cette durée :

$$R(t = \text{MTBF}) = \exp - 1 = 0,368$$

- La fiabilité est indépendante de l'âge du composant. Elle ne dépend que de la durée de la mission. Ce qui signifie, suivant le schéma 1, qu'un composant ayant déjà fonctionné correctement durant le temps T présente pour une mission de durée t une probabilité de bon fonctionnement égale à $R(t)$ et non $R(T + t)$.

Le temps pris en compte durant la période de vie utile est la durée de la mission en cours et non l'âge du composant 1.

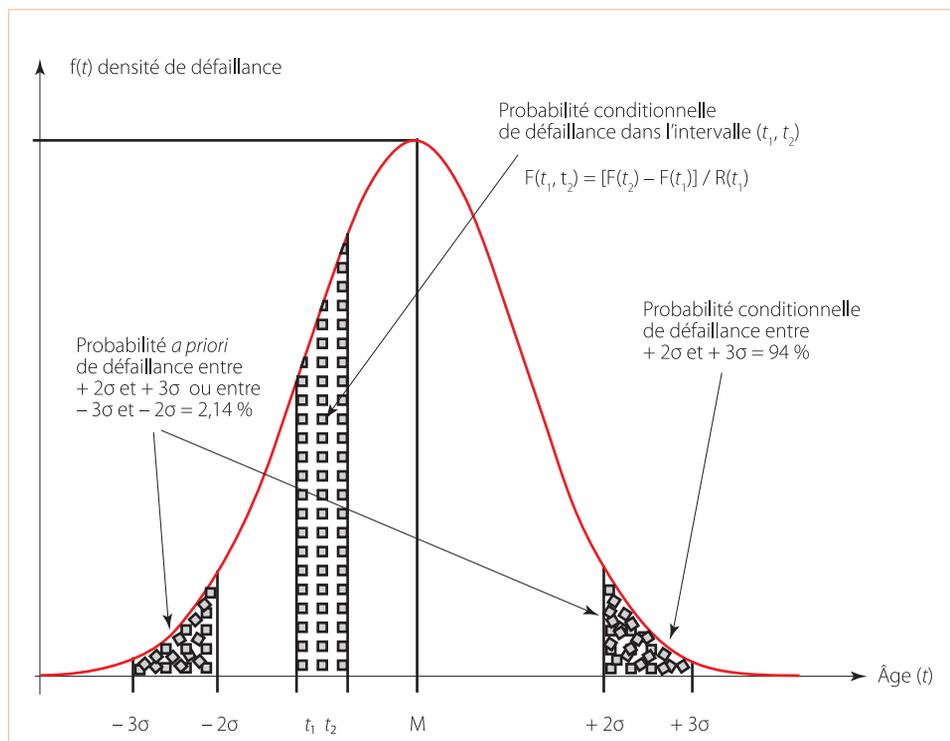
$1 < \beta < 4$

Les phénomènes en cause sont dus au vieillissement :

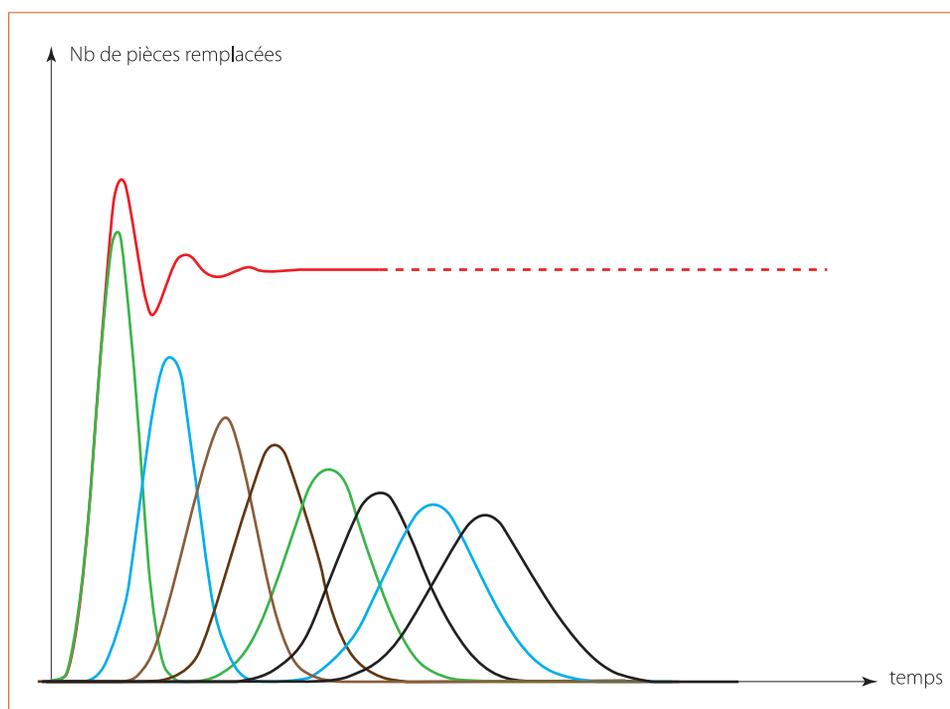
- $\beta = 2$: corrosion ou fatigue
- $\beta = 3,45$: usure. Pour cette valeur de β , la loi représentative du phénomène est la loi normale. À partir de $\beta = 3$, on assimile la loi à une loi normale 2, la loi de Weibull étant toujours applicable.

Durant cette période, l'échelle de temps débute au temps $t = 0$ et non à $-\infty$.

La moyenne n'est pas à zéro, mais à une valeur égale au MTBF ou, dans ce cas, au temps moyen d'usure M.



2 Les probabilités de défaillance a priori et conditionnelle



3 Pièces remplacées au fur et à mesure de leurs défaillances

De plus, la probabilité de pannes est fonction de l'âge du composant, ce qui signifie qu'en fiabilité on ne peut pas prendre en compte la symétrie de la courbe de Gauss comme on le fait généralement en qualité.

On utilisera, comme sur la figure 2, les notions suivantes :

● **La probabilité de défaillance a priori**

Elle ne tient pas compte de l'âge du composant. Dans ce cas, la probabilité de défaillance durant les périodes $(-3\sigma ; -2\sigma)$ et $(+2\sigma ; +3\sigma)$ sont les mêmes et égales à 2,14 %.

● **La probabilité de défaillance conditionnelle**

Elle s'exprime par :

$$F(t_2 : t_1) = [F(t_2) - F(t_1)] / R(t_1)$$

L'exploitant d'un équipement soumis à des phénomènes de vieillissement sera surtout intéressé par la fiabilité conditionnelle, qu'il devra aussi prendre en compte pour la définition des périodicités de maintenance conditionnelle [2] et des paramètres de gestion des stocks de pièces de rechange.

Le cas de pièces remplacées au fur et à mesure de leurs défaillances

Pour des composants soumis à un phénomène de vieillissement (taux d'avarie fonction de l'âge) et remplacés au fur et à mesure de leur défaillance (c'est le cas dans l'industrie), le taux apparent de remplacement ou d'avarie de ces composants est constant.

Le remplacement progressif des composants rajeunit la population et ainsi le taux de panne diminue dans le temps puis se stabilise 3. Ces composants présentent un taux de panne sensiblement constant et égal à :

$$\lambda = 1 / MTBF$$

La courbe en baignoire, image d'Épinal de la fiabilité

On a l'habitude de schématiser ces différentes périodes par la courbe en baignoire représentant l'évolution du taux d'avarie en fonction du temps. Sur celle de la figure 4, les trois périodes sont considérées comme indépendantes les unes des autres.

Or nous avons vu que chacune d'entre elles est la représentation de la loi de Weibull pour une variable t

variant de zéro à l'infini. Il y a donc addition de ces trois lois.

Bien entendu, suivant les composants, ces périodes peuvent exister ou non. De plus, β peut prendre toutes les valeurs intermédiaires entre 0 et 4.

Si l'on additionne ces trois périodes possibles, on obtient la courbe de la figure 5, qui n'a plus grand-chose à voir avec une baignoire. Mais un aspect intéressant de cette image est de montrer que, pour un composant donné :

– la sélection de composants de bonne qualité permet d'éliminer la période infantile ;

– le remplacement des composants à l'instant T_U , avant que le taux d'avarie dû au vieillissement devienne supérieur au taux d'avarie de la vie utile, permet d'obtenir un taux d'avarie minimal. D'où le nom de *période de vie utile*.

Ces conditions ne peuvent être appliquées que si l'on connaît la loi de fiabilité relative au phénomène de vieillissement subit par le composant.

Remarquons que dans le cas où la période correspondant à $\beta = 1$ n'existe pas, cette notion de vie utile correspond à une utilisation durant la période de vieillissement entre le temps 0 et un temps $t - (n \cdot \sigma)$ (σ étant l'écart type de la loi de vieillissement, n le nombre d'écart types choisi pour que le taux d'avarie soit inférieur au seuil que l'on s'est fixé ; en général on adopte 3 ou 4 η).

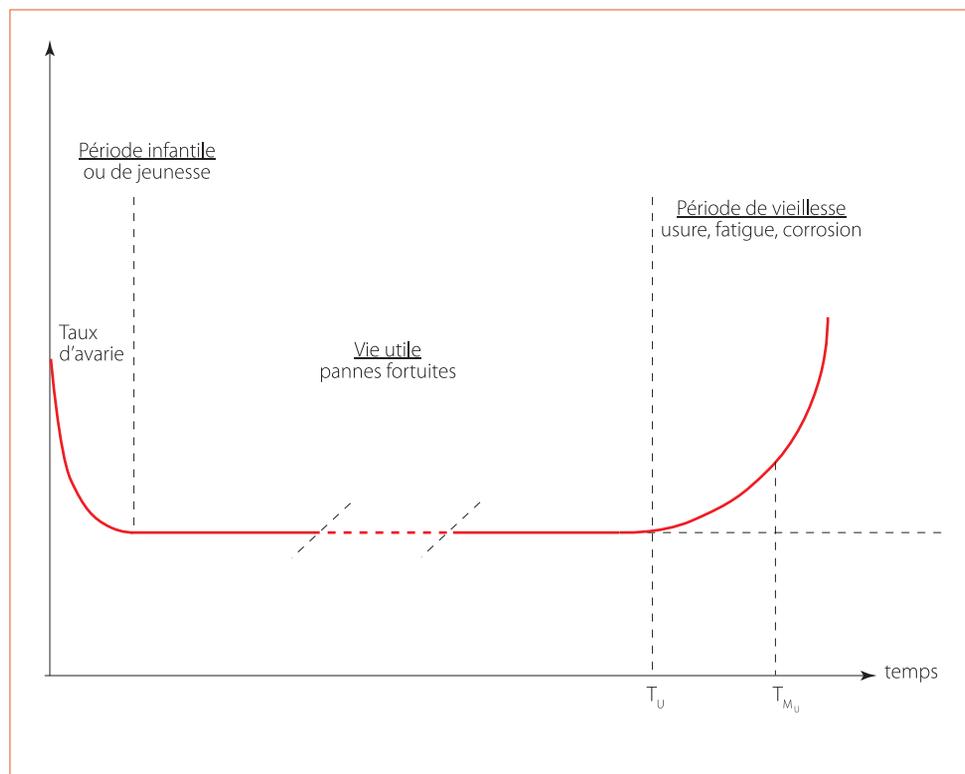
La fiabilité d'un composant ou d'un équipement

On a examiné cette image de la durée de vie d'un composant, mais qu'en est-il pour un équipement ?

Un équipement est constitué d'un grand nombre de composants (20 000 pour une F1, 40 000 pour une BMW série 3) ; tous suivent la loi de Weibull, mais, de l'un à l'autre :

– les paramètres β , η , γ sont différents ;

– les variables temps sont différentes (âge ou durée de la mission, nombre d'heures de fonctionnement, de sollicitations ou de kilomètres parcourus).



4 L'image d'Épinal du taux d'avarie

Sachant que ces différents composants sont en série ou en parallèle (redondance), la fiabilité d'un équipement sera la résultante d'autant de lois de fiabilité qu'il y a de composants (20 000 pour la F1, 40 000 pour la BMW). Il est donc indispensable d'adopter des hypothèses simplificatrices.

Pour déterminer le MTBF prévisionnel d'un équipement et surtout son taux d'avarie, on construira des diagrammes de fiabilité ou schémas-blocs, la fiabilité de chaque branche étant calculée par multiplication des fiabilités ou des probabilités de défaillance. Pour effectuer ces calculs, on suppose que tous les composants suivent une loi de fiabilité exponentielle pour laquelle l'unité de temps est la même.

Cette hypothèse est acceptable dans deux configurations extrêmes :

● 1^{re} configuration

On empêche l'apparition du phénomène d'usure par remplacement systématique des composants avant la fin de leur vie utile, c'est-à-dire à $M_U - 3 \text{ à } 4 \sigma$. Cela est possible pour des matériels :

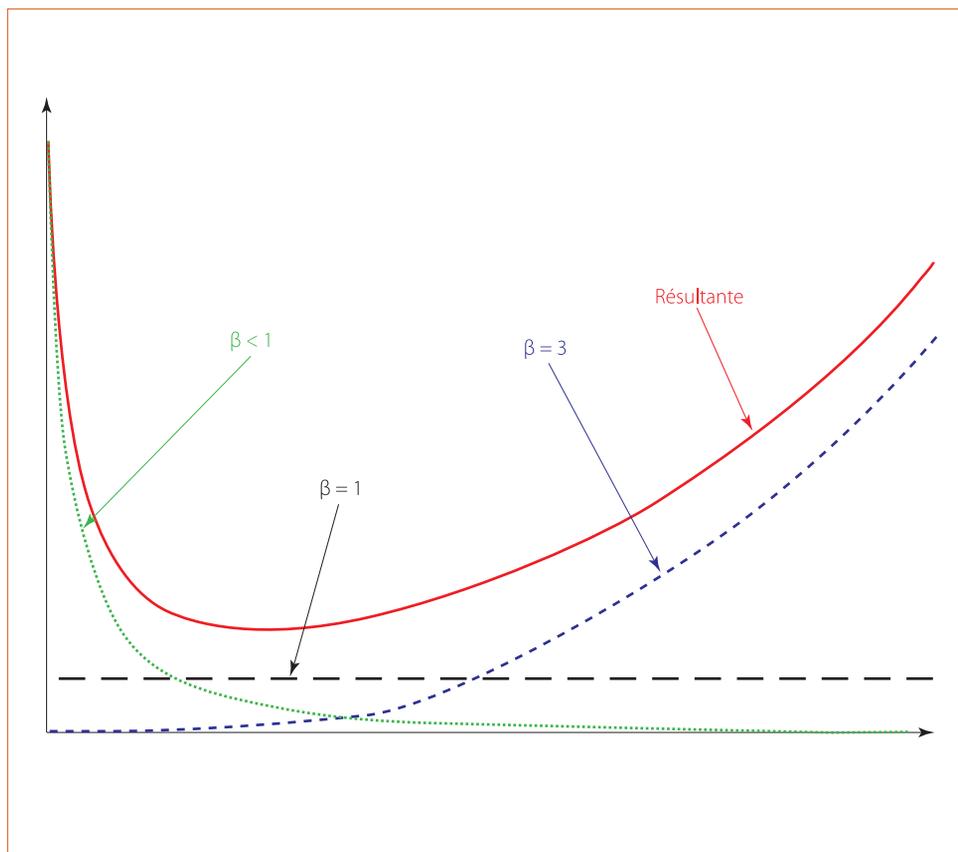
- de durée de vie longue pour lesquels on recherche une grande fiabilité en fonctionnement et pour lesquels on adopte une politique de maintenance préventive ;

- à mission unique, dont le temps d'utilisation est si court que la probabilité de panne d'usure est très faible, même s'il existe un grand nombre de composants en série.

● 2^{de} configuration

On laisse au contraire les composants s'user et on ne les remplace qu'au fur et à mesure des pannes. Ce cas concerne seulement des matériels réparables ou remplaçables à longue durée de vie et dont les temps d'indisponibilité sont compatibles avec les exigences d'exploitation. Dans ce cas, les taux d'avarie obtenus sont très supérieurs à ceux de la première configuration.

Notons que le phénomène de stabilisation du taux d'avarie présenté dans le cas du remplacement d'un composant au fur et à mesure de ses



5 Le taux d'avarie d'un composant

défaillances se manifeste de manière identique dans le cas d'un équipement constitué par un ensemble de composants présentant des lois de fiabilité différentes. Si on se limite à l'étude globale de l'équipement, son taux d'avarie apparent sera constant.

Pour se placer dans une de ces configurations, *il est indispensable de connaître la loi de fiabilité* relative au vieillissement de chaque composant, afin de :

- déterminer la périodicité de la maintenance préventive (à quel moment le taux d'avarie dû au vieillissement deviendra supérieur à celui de la vie utile) ;

- vérifier dans le cas d'une mission unique que la fiabilité combinée est encore acceptable.

En l'absence de bases de données de constructeurs *fiabiles*, cette connaissance ne pourra être obtenue que par *une exploitation correcte des historiques relevés ou la réalisation d'essais d'endurance* en évitant tous les pièges que je viens d'évoquer.

En conclusion

Nous avons passé en revue les points principaux que l'on doit garder à l'esprit lorsqu'on étudie la fiabilité afin d'éviter que les mathématiques n'éloignent des réalités du terrain.

Dans mon livre, *Fiabiliser les équipements industriels*, j'ai essayé de concilier connaissance un peu théorique et expérience pour que chacun – concepteur, exploitant, mainteneur – aborde les problèmes de manière plus efficace et s'assure que le processus, base du retour d'expérience qu'il va étudier, soit bien sous contrôle statistique.

On ne peut faire des prévisions qu'en étudiant un système stable, et elles ne pourront s'appliquer que dans des conditions semblables à celles qui ont été prises comme référence. ■

► Bibliographie

- BUFFERNE (Jean) :
 [1] *Le Guide de la TPM*, Éditions d'organisation, 2006
 [2] « Optimiser la maintenance préventive », *Maintenance & entreprises*, n° 599, sept. 2007, disponible sur www.jean-bufferne.com