

Fiabilité des systèmes en électronique

par Robert LAPLACE
A.F.P.A., 03100 Montluçon

Il ne suffit pas de réaliser un système qui fonctionne à un instant t , mais faut-il encore évaluer sa durée de vie. Cette durée de vie doit être aussi longue que possible : le système doit être fiable. D'où l'importance de pouvoir évaluer la fiabilité d'un système.

FIABILITÉ : A QUEL PRIX ?

Lorsque vous achetez une automobile, le constructeur vous offre une garantie d'une année : il vous garantit le **bon fonctionnement** du véhicule pendant une année, vous n'aurez aucune panne, aucune **défaillance**, sinon le constructeur remplace l'organe défectueux gratuitement. Le constructeur a calculé et estimé que pendant la première année de mise en circulation son véhicule est **fiable** : il est peu **probable** qu'une panne se produise et si panne il y avait, cela ne lui coûterait pas cher d'effectuer gratuitement la réparation, car le prix de la garantie est payé lors de l'achat du véhicule. Le constructeur a conçu et calculé tous les organes du véhicule pour que la **probabilité** d'une panne la première année soit la plus faible possible. Et s'il portait la garantie à deux ans ? il est très probable que le prix de votre véhicule serait supérieur.

De cet exemple se dégagent les points essentiels des problèmes de fiabilité :

- il est bien évident que plus le système est fiable, plus il est cher (à l'achat) ; il y a donc compromis entre le coût et la fiabilité,
- au terme **fiabilité** il faut associer les termes **défaillance** et **probabilité de bon fonctionnement** (ou temps de bon fonctionnement entre deux défaillances).

Nous voyons que cet exemple permet d'introduire des termes et notions importantes relatives à la fiabilité d'un système. Il en manque encore au moins une essentielle. Reprenons notre exemple : lorsque vous utilisez votre véhicule, hors période de garantie, vous souhaitez

cependant ne pas tomber en panne (sur l'autoroute, un chemin de campagne), alors le constructeur vous suggère, pour éviter ces désagréables surprises, une **révision** tous les 15 000 km par exemple : c'est la **période de révision**, si vous respectez les conseils du constructeur, vous aurez un véhicule toujours en bon état de marche car si la révision a été faite correctement, les organes défectueux ou susceptible de le devenir auront été changés par des neufs avant de provoquer une panne grave. Au contraire si vous décidez de ne pas faire réviser votre véhicule, il est probable qu'au bout d'un certain nombre de kilomètres vous aurez une panne provoquant l'arrêt de votre véhicule.

Avec ce dernier exemple plusieurs points essentiels se dégagent :

- plus un système vieillit et moins il devient fiable, sans période de révision, au bout d'un certain temps, la fiabilité tend vers zéro,
- la révision permet en quelque sorte de retarder le vieillissement du système, c'est une remise à neuf,
- la durée entre deux révisions ou période de révision est fonction de la fiabilité du système : plus le système sera **fiable** et plus la **période de révision** pourra être **grande**, mais un système fiable coûte **cher**, par contre une révision nécessite une **immobilisation** du système (maintenance préventive), donc il n'est pas souhaitable d'avoir des révisions trop fréquentes (période de révision courte). Là encore il y a un compromis à réaliser entre **fiabilité** et **période de révision**.

QUELQUES DÉFINITIONS

• Fiabilité : $R(t)$

C'est l'aptitude d'un dispositif à accomplir une fonction requise dans des conditions d'utilisation et pour une période déterminée.

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N_0} = \frac{\text{Nombre d'éléments restants en survie}}{\text{Nombre d'éléments à l'origine}}$$

Soit par exemple 200 pièces en fonctionnement, au bout de 100 heures il en reste 190 en fonctionnement d'où :

$$R(t) = 190/200 = 0,95 \text{ soit } 95 \%$$

(il y aura encore 95 % de pièces en fonctionnement au bout de 100 heures).

- **Probabilité de non survie : (F(t))**

$$F(t) = 1 - R(t)$$

Dans l'exemple ci-dessus il y a 5 % de pièces en non fonctionnement au bout de 100 heures.

- **Densité de probabilité : (f(t))**

C'est la probabilité du nombre de pièces défectueuses pendant Δt .

$$f(t) = \frac{R(t - \Delta t) - R(t)}{\Delta t} = \frac{-\Delta R(t)}{\Delta t} = \frac{\Delta F(t)}{\Delta t}$$

Cette relation représente la dérivée de la fonction R(t) (à un signe près).

$$f(t) = \frac{dF}{dt} = -\frac{dR}{dt}$$

- **Taux de défaillance : $\lambda(t)$**

C'est la probabilité de panne pendant Δt : cela permet de connaître la fréquence relative des défaillances dans un intervalle de temps Δt .

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$$

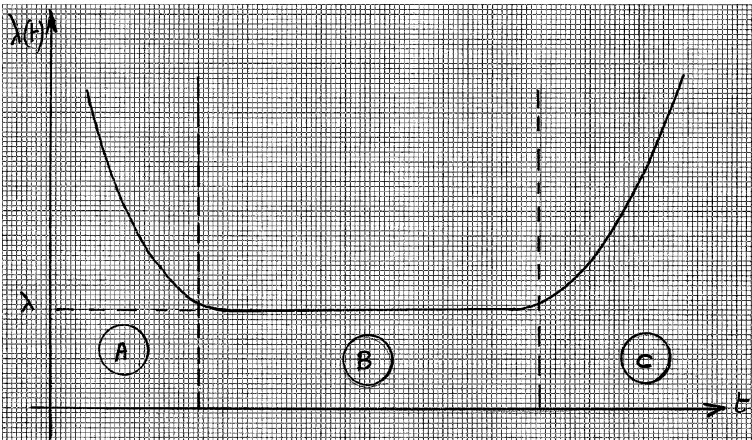


Figure 1

La courbe représentant $\lambda(t)$ (appelée aussi «courbe en baignoire») est celle de la figure 1. Son allure s'explique facilement : il faut distinguer trois zones A, B et C.

– La zone A : le taux de défaillance est élevé. Cette partie de courbe représente les pannes de jeunesse (nouveaux composants, nouvelles méthodes de fabrication). Ce taux diminue avec le temps (on maîtrise mieux le composant et les méthodes de fabrication donc augmentation de la fiabilité et diminution du taux de défaillance). Cette période est plus ou moins longue suivant la nature du produit.

– La zone B : le taux de défaillance est constant et relativement faible. C'est la durée d'un fonctionnement normal du produit. Cette durée varie suivant la nature du produit : pour un composant électronique employé dans des conditions normales, elle est très longue (plus de 100 000 heures).

– La zone C : le taux de défaillance est croissant, c'est la vieillesse du produit (usure).

• Durée de vie moyenne (Θ)

C'est la moyenne des temps de bon fonctionnement (M.T.B.F.) (espérance mathématique du temps entre défaillances).

$$\Theta = \int_0^{\infty} t f(t) dt = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

FIABILITÉ DES SYSTÈMES EN ÉLECTRONIQUE

• Calcul de $R(t)$, $\lambda(t)$, Θ

des relations ci-dessus :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \Rightarrow \lambda(t) \cdot dt = \frac{f(t)}{R(t)} \cdot dt$$

soit le calcul de l'intégrale $I = - \int_0^t \lambda(u) \cdot du$

$$I = - \int_0^t \lambda(u) \cdot du = - \int_0^t \frac{f(u)}{1 - F(u)} \cdot du = \int_0^t \frac{dR}{1 - F(u)}$$

$$I = \int_0^t \frac{d(1 - F(u))}{1 - F(u)}$$

La primitive de cette fonction est $\text{Log } u$ (logarithme népérien)

$$\begin{aligned} \text{d'où :} \quad I &= \left[\text{Log}(1 - F(u)) \right]_0^t = \left[\text{Log } R(u) \right]_0^t \\ &= \text{Log } R(t) - \text{Log } R(0) \text{ or } R(0) = 1 \end{aligned}$$

(à $t = 0$ la probabilité de bon fonctionnement est de 1 ou 100 %)

$$\text{d'où :} \quad I = \text{Log } R(t) = - \int_0^t \lambda(u) \cdot du$$

Cette intégrale I s'appelle **RISQUES CUMULÉS** (cumulative hazard), d'où l'expression de $R(t)$:

$$R(t) = e^{- \int_0^t \lambda(u) \cdot du}$$

• Cas particulier

En électronique on utilise un risque cumulé constant $\lambda(u) = \text{constante} = \lambda$.

$$\text{On a donc :} \quad R(t) = e^{-\lambda t}$$

$$\text{or :} \quad \Theta = \int_0^\infty R(t) \cdot dt = \int_0^\infty e^{-\lambda t} \cdot dt = \left[-\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t} \right]_0^\infty$$

$$\text{d'où :} \quad \Theta = \frac{1}{\lambda} \quad \text{l'unité de } \lambda \text{ est en 1 heure.}$$

Remarque : En électronique $\lambda(t) = \lambda = \text{constante}$ car on étudie le taux de défaillance correspondant à la zone B de la courbe baignoire. Si $\lambda(t)$ n'était pas constant alors il faudrait exprimer d'autres lois de survie (loi de Weibull, loi Gauss-Laplace, loi Log-Normale...).

DÉTERMINATION DES TAUX DE DÉFAILLANCE λ EN ÉLECTRONIQUE

Comme nous l'avons vu les taux de défaillance des composants sont constants. Il existe des documents fournissant ces taux de défaillance tel que la norme «MIL-HDBK-217D» de l'administration militaire américaine. Le centre de fiabilité du C.N.E.T. (Centre National d'Étude des Télécommunications) publie des documents à ce sujet.

Les composants sont classés par type :

- composants passifs (résistances, condensateurs...),
- diodes, transistors...,
- circuits intégrés,
- connections (soudure, wrapping...),
- etc...

Le taux de défaillance est déterminé suivant le type de composant, des contraintes d'emploi (température, lieu d'utilisation...).

Exemple de calcul : cas des circuits intégrés :

$$\lambda = \pi_e \cdot \pi_q \cdot \pi_l \cdot \lambda_b$$

$\pi_e = 0,04$ à 22 dépend de l'environnement où est utilisé le composant (environnement sans contrainte particulière : $0,04$ - environnement de lancement de missile : 22).

$\pi_q = 1$ à 300 représente la qualité du composant.

$\pi_l = 1$ à 10 représente le facteur d'apprentissage pour le fabricant (un composant fabriqué depuis longtemps est plus fiable qu'un nouveau composant).

$$\lambda_b = c_l \cdot \pi_t \cdot \pi_v \cdot \pi_e (c_2 + c_3).$$

c_l : dépend du nombre de circuits logiques.

π_t : dépend de la température de fonctionnement du composant.

π_v : dépend de la tension d'alimentation du composant.

c_2 : dépend de la complexité du composant (de même nature que c_l).

c_3 : dépend du nombre d'interconnexions vers l'extérieur, du type de boîtier.

Nous voyons que le calcul d'un taux de défaillance pour un composant donné n'est pas aussi simple que cela, et peut donner des

valeurs assez différentes suivant les paramètres choisis. Le tableau ci-dessous donne quelques taux de défaillance pour des systèmes électroniques embarqués (avion) prévus pour un fonctionnement dans une ambiance de 80°.

Résistance :	$0,1 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-1}$
Condensateur céramique :	$0,18 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-1}$
Diode signal :	$0,05 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-1}$
Transistor petit signal :	$0,6 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-1}$
Amplificateur opérationnel :	$1,9 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-1}$
Circuit logique :	$1 \text{ à } 4 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-1}$
Relais :	$4,5 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-1}$
Une soudure :	$0,021 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-1}$
Connecteur 19 broches :	$0,22 \cdot 10^{-6} \cdot h^{-1}$

CALCUL DU M.T.B.F. D'UN SYSTÈME ÉLECTRONIQUE

On procède de la façon suivante :

- découper les schémas électroniques en schémas blocs (fonctions élémentaires),
- pour chaque bloc, effectuer une nomenclature des composants,
- indiquer le taux de défaillance de chaque composant,
- faire la somme des taux de défaillance de l'ensemble des blocs,
- puis calculer la probabilité de bon fonctionnement (R(t)) et le M.T.B.F.

Premier cas :

Soit par exemple le schéma bloc d'un ensemble électronique suivant.

$$R(t) \text{ total} = R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot \dots \cdot R_n$$

$$\lambda \text{ total} = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = \Sigma \lambda$$

$$\Theta \text{ total} = \frac{1}{\lambda \text{ total}}$$

Deuxième cas :

Il est fréquent que la fiabilité d'un système électronique soit trop faible. Une probabilité de bon fonctionnement de 80 % au bout de quelques heures peut-être considérée beaucoup trop faible s'il s'agit par exemple de la surveillance d'organes sensibles d'une centrale nucléaire, ou l'utilisation d'appareils dans un bloc opératoire lors d'une intervention chirurgicale. On ne peut pas augmenter la fiabilité des composants, on ne peut pas non plus diminuer excessivement les périodes de révision : la seule solution pour améliorer la fiabilité est de doubler (ou même davantage) certaines fonctions du système (redondance), ainsi si l'une des fonctions est en panne, l'autre assure encore le bon fonctionnement du système.

Exemple : redondance d'ordre 2.

on aura :

$$R(t) = 1 - (1 - R_1)^2$$

$$\Theta = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{3}{2}$$

$$\lambda_{\text{Total}} = \frac{1}{\Theta}$$

Remarque : doubler une fonction, ne double pas le M.T.B.F. mais celui-ci est multiplié par 1.5.

Si la redondance est d'ordre n on aura :

$$R(t) = 1 - (1 - R_1)^n$$

$$\Theta = \frac{1}{\lambda} \cdot \sum_{i=1}^{\infty} 1/i$$

$$\lambda = \frac{1}{\Theta}$$

EXEMPLE

Cet exemple a pour but de montrer l'importance de calculer correctement la fiabilité d'un système, car ce calcul permet de définir parfaitement le produit : compromis entre fiabilité et coût.

Soit un système électronique en cours d'étude, on a calculé un taux de défaillance de 0,0005 (soit un M.T.B.F. de 2 000 heures), la probabilité de bon fonctionnement est :

$$R(t) = e^{-0,0005t}$$

la figure 2 représente $R(t)$ fonction du temps.

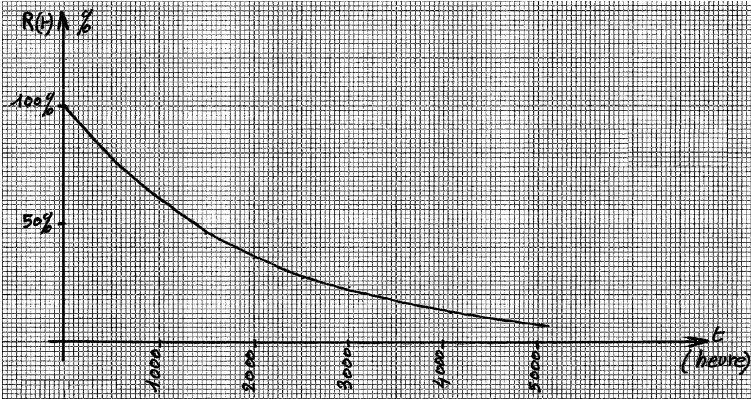


Figure 2

Si ce système est destiné à un bloc opératoire où la vie du malade peut être en danger si le système tombe en panne (ou surveillance d'une centrale nucléaire), le tracé de la courbe $R(t)$ montre qu'au bout d'un certain temps la probabilité de bon fonctionnement diminue (tend vers zéro). Il faut donc réviser le système. Pour simplifier les calculs, on suppose que chaque révision est considérée comme une remise à neuf totale du système (ce qui ne peut pas être vrai dans la réalité). Sachant que la probabilité de bon fonctionnement du système ne doit pas être inférieure à 90 %, ceci impose obligatoirement la période Δt entre deux révisions. En effet on a :

$$R(t) = 0,9 = e^{-0,0005t} \quad \text{d'où } t = \Delta t = 210 \text{ heures}$$

On peut donc considérer qu'après chaque révision le matériel est comme neuf ; la fiabilité du système varie entre 100 % et 90 % (figure 3).

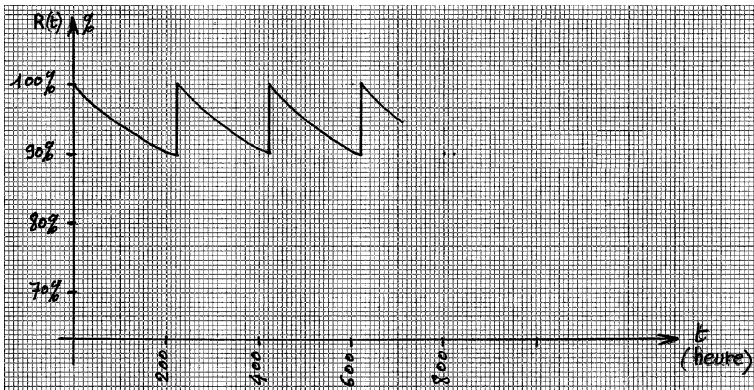


Figure 3

Cependant 90 % de probabilité de bon fonctionnement du système est jugée insuffisante, mais on ne peut pas diminuer la période de révision (coût trop élevé, immobilisation trop longue). On décide d'intégrer au système un auto-test qui à chaque mise sous tension de l'appareil détecte les anomalies de fonctionnement. On considère pour simplifier les calculs que l'auto-test est capable de tester l'ensemble de l'appareil (il est équivalent à une révision faite automatiquement à la mise sous tension du système). Ce n'est pas possible dans la réalité, mais cette simplification met bien en évidence le rôle et l'importance d'un auto-test. Si le nouvel ensemble système + auto-test a un taux de défaillance de 0,00055, (il y a augmentation du taux de défaillance car il a fallu rajouter les circuits pour réaliser l'auto-test) et si le système est supposé fonctionner en moyenne 5 heures dans une salle d'opération par exemple (donc une mise sous tension du système toutes les 5 heures en moyenne) : Quelle serait la probabilité de bon fonctionnement la plus faible pendant l'opération ? Il est bien évident que c'est au bout de 5 heures que les risques de panne seront les plus grands.

D'où :
$$R(t) = e^{-0,00055 \cdot 5} = 0,997 \text{ soit } 99,7 \%$$

La courbe de figure 4 montre l'évolution de $R(t)$ en fonction du temps et des mises sous tension.

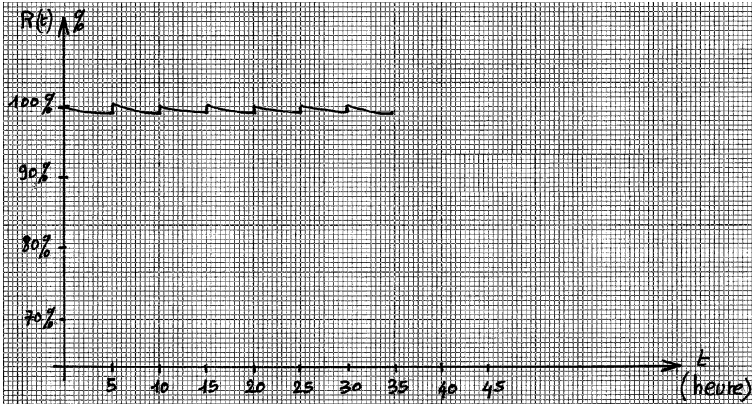


Figure 4

Dans la pratique une révision ne peut pas être une remise à neuf total, de même qu'un auto-test ne peut pas être équivalent à une révision. On aura tout de même une probabilité de bon fonctionnement qui diminue avec le temps. Mais cette probabilité aurait chuté beaucoup plus vite sans révision et sans auto-test (figure 2).

Cet exemple où les données de départ ont été volontairement simplifiées montre bien l'importance des révisions, d'un auto-test mais aussi du choix de la période de révision, car il faut se rappeler que la maintenance préventive coûte cher et immobilise le système, d'où un choix judicieux correspondant à la fiabilité souhaitée pour le produit, durant son fonctionnement. De même un auto-test sera plus ou moins complexe suivant le degré de fiabilité désiré, car là aussi concevoir un auto-test très performant coûte cher (schémas plus complexes, augmentation du nombre de composants).

En conclusion un calcul même simplifié permet de définir une période de révision correcte et la nécessité d'un auto-test suivant la fiabilité que l'on souhaite donner au produit, sachant qu'il y aura toujours compromis entre **coût** et **fiabilité**.

BIBLIOGRAPHIE

- *Fiabilité des systèmes* par P. CHAPOUILLE et R. DE PAZZIS - Édition : Masson.
- *La fiabilité* par P. CHAPOUILLE - Édition : Presse universitaires de France (que sais-je).
- *C.N.E.T.* Revue de fiabilité.
- *AFNOR Norme X06-501.*
- *MIL-HDBK-217D.*