

— Aurélien, Adrien et André Cabarbaye —

Guide d'estimation de la fiabilité

Collection
La fiabilité en pratique



CAB
Innov.

Cab Innovation Editeur

Préface

Je tiens à remercier chaleureusement les auteurs de ce livre, dont l'expertise en Sûreté de Fonctionnement n'est plus à prouver. Ce guide saura, sans nul doute, trouver sa place aux côtés de nombreux fiabilistes.

La fiabilité est devenue un élément essentiel pour les enjeux de sécurité et de performances des entreprises. Depuis quelques années, les entreprises du spatial cherchent à augmenter les performances grâce aux nouvelles technologies tout en se rassurant sur la fiabilité de ces dernières par des estimations de fiabilité.

Ces estimations permettent à la fois de comprendre le passé et de préparer le futur. Cependant, elles posent de nombreuses difficultés de réalisation : nouvelles technologies, prise en compte du retour d'expérience que ce soit opérationnel ou avis d'expert, contrainte du nombre de pièces à mettre en essais, présence de phénomènes d'usure ou de fatigue, environnement et contraintes d'utilisation...

Une des prérogatives du fiabiliste est d'être pragmatique et de toujours juger et mesurer ses résultats avec bon sens. Mais comment appréhender les nouvelles technologies en matière de fiabilité ? Comment les évaluer au mieux tout en prenant en compte les contraintes calendaires et économiques ?

Ce livre n'adresse pas seulement les différentes méthodes d'estimation de fiabilité mais propose une méthode permettant d'obtenir l'estimation de fiabilité la mieux adaptée. Il vise à guider le fiabiliste dans l'évaluation en s'intéressant au côté pratique, sans pour autant négliger les fondements théoriques indispensables à leur compréhension et applications correctes.

Le terme « guide » que l'on retrouve dans le titre est bien vrai ; il permet, à la manière d'une procédure à dérouler, de s'assurer de ne rien omettre ! C'est un plaisir de retrouver, dans un même livre, toutes les méthodes et réflexions à avoir dans une démarche d'estimation de fiabilité.

Les auteurs, grâce à leur expérience mais aussi au temps consacré en R&D dans ce domaine, nous facilite la vie en nous épargnant la majeure partie des erreurs de parcours.

Seul conseil à donner aux lecteurs : « Suivez le guide ! »

Sébastien BOSSE

Responsable du service Sûreté de Fonctionnement au Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)

Direction Technique et Numérique

Avant-propos

Au-delà de la réponse à une exigence contractuelle, l'estimation de fiabilité permet de garantir le bon fonctionnement d'un produit durant sa vie opérationnelle, dans des conditions données.

Mais la fiabilité n'est pas facile à appréhender, par exploitation du retour d'expérience, par calcul ou par essai, car elle dépend de facteurs multiples relatifs aux architectures, aux technologies mises en œuvre et aux conditions d'utilisation et d'environnement.

Recouvrant diverses normes, manuels et articles scientifiques, l'étendue du corpus à mobiliser rend son évaluation difficile, notamment quand les normes applicables sont approximatives et assez éloignées de l'état de l'art.

Aussi, avons-nous été sollicités, par une agence spatiale¹, pour rédiger un guide pratique d'estimation de la fiabilité des composants optoélectroniques, qui ont pour caractéristiques d'être soumis à des phénomènes d'usure.

Mais son domaine d'emploi a rapidement dépassé celui de ses prescripteurs et couvre, de fait, tous les types de composant, dont notamment ceux qui se dégradent dans le temps tels que les transistors de puissance et les composants électroniques les plus récents dont la finesse de gravure occasionne des phénomènes de vieillissement.

Il recouvre la fiabilité mécanique pour les éléments passifs, traite les architectures de systèmes et même les composants monocoups.

Le champ méthodologique est devenu très vaste et concerne pratiquement tous les types de produit.

Mais quoi de plus difficile pour un concepteur que de rechercher une méthode dont il ignore l'existence, et qui est susceptible de résoudre un problème que lui seul est capable de bien formuler ?

¹ [Le Centre National d'Études Spatiales de Toulouse.](#)

C'est la raison pour laquelle ce guide oriente l'utilisateur à partir de sa problématique, en termes de caractéristiques de produit à évaluer et de l'information qui lui est accessible, en ne se limitant pas à une liste de méthodes.

Il se présente sous la forme de chapitres applicables selon la situation qui est appréhendée à partir des réponses à quelques questions :

- S'agit-il d'un élément simple ou de composants multiples ?
- Le composant présente-t-il des risques de défaillance à la sollicitation ou pendant une durée d'utilisation ?
- S'agit-il d'un composant actif ou passif ?
- Les conditions opérationnelles sont-elles uniformes ou variées ?
- Des données de fiabilité sont-elles disponibles ?
- Le composant est-il soumis à des phénomènes d'usure ?
- Le niveau de dégradation est-il observable en opération et/ou en essai ?
- Le composant est-il sensible à des événements rares ?
- Une connaissance a priori (jugement d'expert ou retour d'expérience similaire) est-elle disponible ?
- Des essais sont-ils envisagés ? ...

Il propose ainsi la méthode d'estimation la mieux adaptée, aussi complexe que nécessaire, dans la totalité du champ de la Sûreté de Fonctionnement.

Cette méthode s'accompagne d'une description claire et synthétique de son principe et de ses limitations, ainsi que de la délivrance systématique d'un exemple d'application sous Excel.

Ces exemples nécessitent parfois l'emploi d'un outil d'optimisation ou de simulation et les fichiers de calcul correspondants sont disponibles chez l'éditeur de cet ouvrage.

En vulgarisant ainsi les fondements théoriques de l'estimation de fiabilité, ce livre didactique devrait aider à la ré-industrialisation, dans un contexte de perte de connaissance et de savoir-faire.

Table des matières

<i>Préface</i>	7
<i>Avant-propos</i>	9
<i>Table des matières</i>	12
1. Introduction	15
2. Architecture de systèmes	19
1.1. Module	19
1.2. Blocs indépendants en série ou en parallèle	20
1.3. Architectures complexes	21
1.4. Fiabilité opérationnelle (disponibilité)	24
1.4.1. Réseaux de Petri stochastiques	25
1.4.2. Modèles de simulation récursive	28
3. Facteur d'accélération	31
4. Recueil de fiabilité	35
5. Composant non soumis à usure	39
6. Usure non observable	43
6.1. Données acquises dans des conditions similaires	43
6.2. Données hétérogènes	46
7. Usure observable	49
7.1. Choix d'un modèle de dégradation	49
7.2. Modèle de dégradation non stationnaire accéléré	52
7.3. Loi du premier franchissement d'un seuil	53
8. Sensibilité à des événements rares	57
9. Exploitation d'une connaissance a priori	61
9.1. Estimation bayésienne	61
9.2. Formulation d'une loi a priori	64
10. Composants passif et mécanique	69
10.1. Dimensionnement déterministe et probabiliste	69
10.2. Méthode analytique	71

10.3.	Simulation de Monte-Carlo	72
10.4.	Transformation en variables normales centrées réduites	75
10.5.	Méthode FORM-SORM	76
10.6.	Traitement d'un cas d'école	79
11.	Mise en œuvre des essais de fiabilité.....	83
12.1.	Dimensionnement préliminaire.....	84
12.2.	Choix des conditions de stress en essais	87
12.3.	Planification optimale.....	89
12.4.	Cas des systèmes monocoup	91
12.4.1.	Planification des essais.....	92
12.4.1.1.	One-shot	93
12.4.1.2.	Bruceton	93
12.4.1.3.	Probits.....	93
12.4.1.4.	Neyer.....	94
12.4.1.5.	Caboum.....	95
12.4.2.	Méthode des essais durcis.....	96
12.	Conclusion	99
	INDEX.....	102
	Table des illustrations	105

1. Introduction

Ce guide a pour objet d'aider à évaluer la fiabilité des produits sous la forme de simple composant ou d'équipement intégré.

Il se présente sous la forme de différents chapitres applicables selon les caractéristiques du produit à évaluer, comme l'indique l'organigramme de la figure 1.

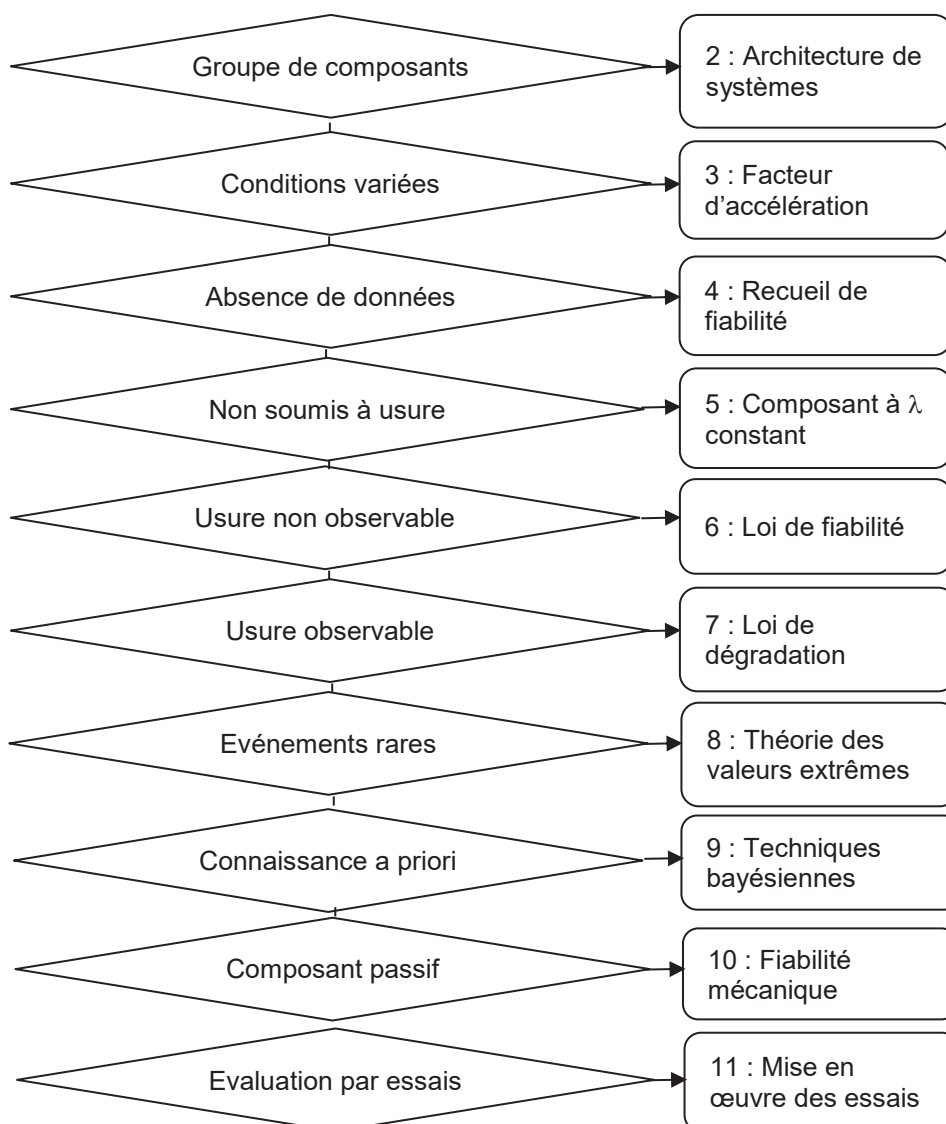


Figure 1 : Utilisation du guide selon la situation

La fiabilité peut concerner des produits présentant des risques de défaillance à la sollicitation ou pendant une durée d'utilisation.

Les premiers sont caractérisés par un taux de réussite p (probabilité de bon fonctionnement) ou un taux d'échec $(1 - p)$ à l'utilisation, tel qu'un relai pouvant se bloquer lors de la commutation, par exemple.

La probabilité d'avoir k succès parmi n essais indépendants est donnée par la loi binomiale :

$$P_k = C_n^k p^k (1 - p)^{n-k}$$

En effet, la probabilité d'occurrence de deux événements est égale au produit de leurs probabilités respectives si, et seulement si, ils sont indépendants.

Ce type de produit recouvre notamment les systèmes monocoup dont le fonctionnement est limité à une seule utilisation, tels qu'un airbag de voiture, par exemple.

Leur fonctionnement dépend généralement d'un paramètre fonctionnel, tel que le courant d'activation d'un initiateur pyrotechnique ou la masse de poudre d'une cisaille pyrotechnique, utilisée pour couper les câbles de déploiement des générateurs solaires des satellites.

La fiabilité des systèmes monocoup recouvre la panne retard (absence de fonctionnement) et la panne avance (fonctionnement intempestif).

Cette fiabilité peut être estimée par des essais spécifiques qui sont développés dans le dernier chapitre de ce guide sur la mise en œuvre des essais de fiabilité.

Les produits présentant des risques de défaillance pendant une durée d'utilisation se caractérisent par un taux de défaillance.

Le taux de défaillance instantané $\lambda(t)$ correspond à la densité de probabilité d'occurrence d'une panne qui n'est pas encore survenue.

Ce taux est lié à la fiabilité par l'intégrale : $R(T) = e^{-\int_0^T \lambda(t) dt}$

Si le taux est constant, cette relation devient : $R = e^{-\lambda t}$

Un composant à taux de défaillance constant reste à l'état neuf tant qu'il n'est pas en panne.

Un taux de défaillance croissant révèle un phénomène de dégradation alors qu'un taux décroissant correspond à une diminution des pannes de jeunesse.

La fiabilité d'un ensemble de deux composants indépendants à taux constant a pour expression :

$$R = R_1 R_2 = e^{-\lambda_1 t} e^{-\lambda_2 t} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2) t}$$

Le taux de défaillance équivalent correspond au taux de panne constant d'un élément dont la fiabilité est la même que celle d'un équipement donnée pour une certaine durée de mission.

$$R = e^{-\lambda_{\text{équivalent}} t_{\text{mission}}}$$

Ce taux n'a évidemment de sens que pour cette seule valeur de temps et ne doit pas être utilisé abusivement. De même, les calculs à partir de valeurs de taux de défaillance instantané sont à éviter pour limiter les risques d'erreur.

Ce guide porte notamment sur les composants électroniques sujets aux phénomènes d'usure (*Wear out*) qui s'ajoutent aux pannes aléatoires (*Random failure*).

Ces composants se caractérisent par un taux de défaillance instantané qui intègre un terme croissant et une partie constante.

$$\lambda(t) = \lambda_{\text{Random}} + \lambda_{\text{Wear out}}(t)$$

12. Conclusion

L'estimation de fiabilité recouvre une démarche rationnelle de maîtrise de la conception des produits dont l'enjeu n'est trop souvent perçu qu'au lendemain de graves dysfonctionnements.

La fiabilité est égale au produit des fiabilités des divers composants d'un produit (hors redondance ou dépendance) dont chacun peut être affecté par différents modes de défaillance, eux-mêmes influencés par les conditions d'utilisation et d'environnement

Elle se calcule selon la nature des technologies mises en œuvre.

Le mode de défaillance peut être lié à un phénomène d'usure ou présenter un caractère aléatoire dont le taux est alors constant et peut s'estimer par la loi du Khi-2 à partir de données de retour d'expérience ou de résultats d'essais (nombre de défaillances pendant une durée cumulée).

Ce taux peut s'agréger à une connaissance a priori (celui donné par un recueil de fiabilité par exemple) au moyen de techniques bayésiennes, pour améliorer sa précision ou simplifier les essais nécessaires à la démonstration d'un objectif de fiabilité (nombre de pièces à tester ou durée).

Fondée sur le théorème de Bayes, la démarche est solide sur le plan des mathématiques mais sa validité ne repose que sur la qualité de la connaissance a priori.

La fiabilité liée à un phénomène d'usure non observable peut être estimée en ajustant une loi de probabilité (Weibull, lognormale...) à partir de données de retour d'expérience ou de résultats d'essais.

Dans le cas où la dégradation est observable, la fiabilité peut être estimée de la même manière au moyen d'un modèle de dégradation (processus de Wiener non stationnaire...) en choisissant un seuil limite de fonctionnement.

La précision de l'estimation est alors bien meilleure (ou les essais grandement simplifiés) puisque chaque composant fournit de

nombreuses données relatives à son niveau de dégradation courant et non pas une seule durée de fonctionnement.

Le modèle de fiabilité ou de dégradation peut se coupler à des lois d'accélération (Arrhenius...) dont les paramètres (Energie d'activation...) peuvent être directement estimés par l'ajustement si les conditions d'essais ou de retour d'expérience sont hétérogènes.

La fiabilité peut concerner un composant passif ou un ensemble mécanique, dont l'estimation résulte plutôt d'une analyse de la conception que d'un retour d'expérience ou de résultats d'essais (onéreux et parfois difficilement réalisables).

Dans le cas d'un dimensionnement déterministe, les aléas et dispersions de toute nature sont couverts par des marges à travers des coefficients de sécurité ou des analyses de pire cas.

Dans le cas d'un dimensionnement probabiliste, la fiabilité du produit peut être estimée par une simulation de Monte-Carlo de son fonctionnement opérationnel ou par une méthode analytique fondée sur des variables aléatoires préalablement transformées en variables gaussiennes (Résistance - Contrainte, FORM-SORM...).

Des essais sont souvent incontournables pour estimer la fiabilité d'un produit, même s'ils sont généralement onéreux. Ils peuvent être cependant optimisés pour en diminuer le coût.

Guide d'estimation de la fiabilité

Au-delà de la réponse à une exigence contractuelle, l'estimation de fiabilité permet de garantir le bon fonctionnement d'un produit durant sa vie opérationnelle, dans des conditions données.

Mais la fiabilité n'est pas facile à appréhender, par calcul ou par essai, car elle dépend de facteurs multiples relatifs aux architectures, aux technologies mises en œuvre et aux conditions d'utilisation et d'environnement.

Recouvrant diverses normes, manuels et articles scientifiques, l'étendue du corpus à mobiliser rend son évaluation difficile, notamment quand les normes applicables sont approximatives et assez éloignées de l'état de l'art.

Mais quoi de plus difficile pour un concepteur que de rechercher une méthode dont il ignore l'existence, et qui est susceptible de résoudre un problème que lui seul est capable de bien formuler ?

Ce guide oriente l'utilisateur à partir de sa problématique, en termes de caractéristiques du produit et de l'information accessible, et non pas d'une liste de méthodes.

Il propose la pratique la mieux adaptée à chaque situation avec :

- une description claire et synthétique de son principe et de ses limitations,
- la délivrance systématique d'un exemple d'application accompagné de son fichier de calcul sous Excel.

En vulgarisant ainsi les fondements théoriques de l'estimation de fiabilité, ce livre didactique devrait aider à la réindustrialisation, dans un contexte de perte de connaissance et de savoir-faire.



Docteur ingénieur en aéronautique, Aurélien Cabarbaye est un expert en conception des drones et en maintenance prédictive.



Ingénieur en informatique et électronique, Adrien Cabarbaye est un spécialiste du Big data et de l'optimisation multidisciplinaire.



Expert sénior en Sûreté de fonctionnement durant son activité au Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), André Cabarbaye est le gérant de la société Cab Innovation.

ISBN : 979-10-97287-15-3



Prix : 69 € TTC