

Guide pratique d'estimation de fiabilité

Practical guide to reliability estimation

Cabarbaye André
Cab Innovation
Toulouse
andre.cabarbaye@gmail.com

Bosse Sébastien
CNES
Toulouse
sebastien.bosse@cnes.fr

Gilard Olivier
CNES
Toulouse
olivier.Gilard@cnes.fr

Cabarbaye Adrien
Cab Innovation
Toulouse
adrien.cabarbaye@gmail.com

Cabarbaye Aurélien
Cab Innovation
Toulouse
aurelien.cabarbaye@gmail.com

RESUMÉ - Répondant à un besoin en optoélectronique dans le domaine spatial, ce guide est devenu générique et multisectoriel. Outre l'électronique, il couvre la mécanique, traite des architectures de systèmes, des essais accélérés et même des composants monocoups. Précis mais synthétique (108 pages), il donne immédiatement aux lecteurs l'information nécessaire à la bonne résolution de sa problématique, sans nécessité de prérequis. Il propose la méthode la plus adaptée à chaque situation, avec une description claire de son principe et de ses limitations et la délivrance systématique d'un exemple d'application (32 fichiers de calcul Excel sont fournis avec l'ouvrage). Ce guide pratique devrait ainsi trouver sa place auprès des concepteurs, qui ne disposent pas tous de la culture de la fiabilité, pour réaliser des produits fiables et économes en ressources. S'appuyant sur les nombreuses publications scientifiques et ouvrages de référence, il constitue, par ailleurs, un "garde-fou" méthodologique susceptible d'éviter les erreurs trop souvent rencontrées dans notre métier.

ABSTRACT - Responding to a need for optoelectronics in the space field, this guide has become generic and multi-sectoral. In addition to electronics, it covers mechanics, deals with system architectures, the implementation of accelerated tests and even single-shot components. Precise but concise (108 pages), it immediately gives readers the information necessary to properly resolve their problem, without the need for prerequisites. It offers the method most suited to each situation, with a clear description of its principle and its limitations and the systematic delivery of an application example (32 Excel files are provided with the book). This practical guide should therefore find its place among designers, who do not all have a culture of reliability, to create reliable and resource-efficient products. Based on numerous scientific publications and reference works, it also constitutes a methodological "safeguard" capable of avoiding the errors too often encountered in our profession.

MOTS-CLEFS : Guide, Fiabilité, Conception, Formation.

I. INTRODUCTION

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. C'est la raison pour laquelle le Centre National d'Études Spatiales de Toulouse a cherché à élaborer un guide pratique d'estimation de la fiabilité des composants optoélectroniques, qui ont pour caractéristiques d'être constitués d'éléments actifs ou passifs, dont certains sont soumis à des phénomènes d'usure. Mais le domaine d'emploi de cet ouvrage a rapidement dépassé celui de ses prescripteurs en couvrant, 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. Aussi, avons-nous décidé d'en rédiger une version générique multisectorielle qui recouvre notamment la fiabilité mécanique pour les éléments passifs, traite des architectures de systèmes et même des composants monocoups dont le fonctionnement est limité à une seule utilisation, tels qu'un airbag de voiture par exemple. Mais devons-nous réaliser, à nouveau, une encyclopédie [1] [2] [3] qui synthétise toute la connaissance dans les domaines de la Sûreté de Fonctionnement et de la conception des systèmes, au risque d'y perdre le lecteur dans sa quête d'une réponse immédiate à un problème donné ? Ce guide pratique à l'intention des concepteurs devait innover dans sa méthodologie.

II. METHODOLOGIE

Le champ méthodologique couvert 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 ? Aussi, l'un des aspects novateurs de ce guide est de l'orienter à partir de sa problématique, en termes de caractéristiques du produit à évaluer et de l'information qui lui est accessible, et non pas d'une liste de méthodes proposée comme menu. 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 ?

Le guide propose alors la méthode 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 (fourni avec le guide) dont le traitement nécessite parfois l'emploi d'un outil d'optimisation ou de simulation.

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.

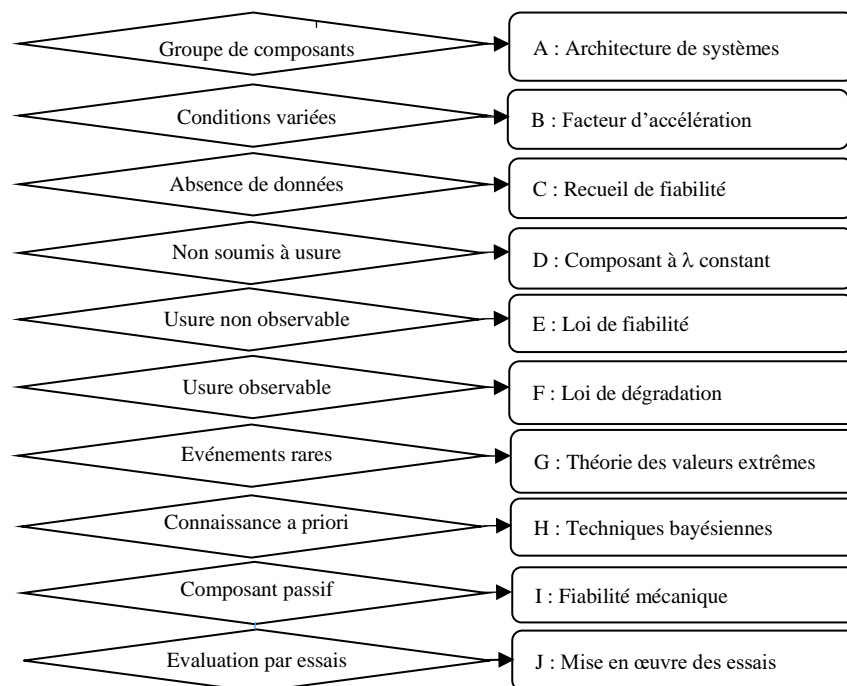


FIGURE 1 : UTILISATION DU GUIDE SELON LA SITUATION

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 ou d'échec à l'utilisation, tel qu'un relai qui se bloque à la commutation. Les seconds se caractérisent par un taux de défaillance instantané, correspondant à la densité de probabilité d'occurrence d'une panne qui n'est pas encore survenue. Un taux de défaillance croissant révèle un phénomène de vieillissement ou de dégradation alors qu'un taux décroissant correspond à une diminution des pannes de jeunesse. Un composant à taux de défaillance constant reste à l'état neuf tant qu'il n'est pas en panne.

III. PRESENTATION DES CHAPITRES

Le contenu des différents chapitres du guide est décrit succinctement ci-après.

A. Architecture de systèmes

L'estimation de la fiabilité opérationnelle (disponibilité) d'un système, intégrant des redondances, protections et dépendances, et faisant l'objet de divers processus de défaillance, réparation et soutien logistique, peut se révéler complexe. Il apparaît, cependant, utile de présenter ici les différentes méthodes de calcul de la fiabilité et de la disponibilité des architectures de systèmes ainsi que les conditions de leur mise en œuvre.

Ce chapitre porte sur les groupes de composants par opposition au composant unique. Il s'intéresse tout d'abord à la notion de bloc, ou module, constitué d'un ensemble de composants sans redondance ni dépendance interne. La fiabilité du module est égale au produit de celles de ses constituants et son taux de défaillance est la somme des taux de ses constituants. Chaque composant peut être affecté par un ou plusieurs modes de défaillance caractérisés, chacun, par un taux de défaillance constant pour les pannes aléatoires (*Random*) ou par un taux croissant pour les phénomènes de dégradation (*Wear out*), en excluant les pannes de jeunesse censées être révélées par des essais de déverminage.

Au-delà des blocs indépendants montés en série ou en parallèle, l'architecture d'un système peut être considérée comme complexe car sa fiabilité ne peut plus s'exprimer par une formule analytique. Elle peut cependant faire l'objet d'un modèle markovien ou d'une simulation de Monte-Carlo comme l'illustre l'exemple de la figure 2, portant sur une source laser. Celle-ci est constituée de 3 chaînes en parallèles de 6 modules montés en série. La perte d'une ou deux chaînes est compensée par une augmentation du courant dans les chaînes restantes qui impacte le taux de défaillance des modules.

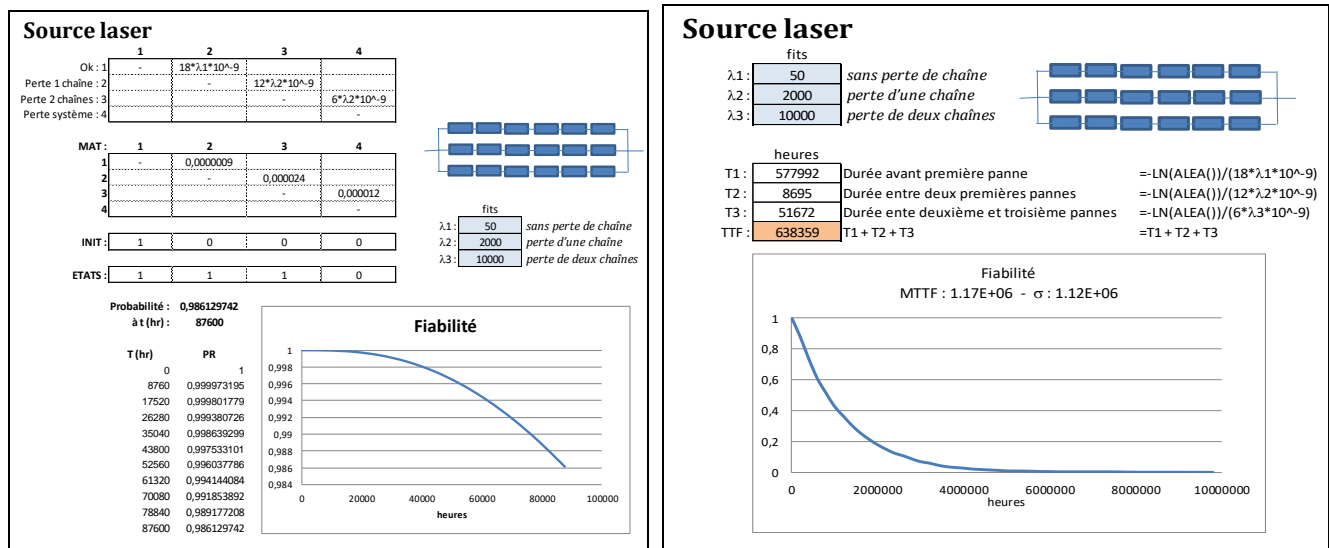


FIGURE 2 : FIABILITE D'UNE SOURCE LASER ESTIME PAR TRAITEMENT MARKOVIN OU SIMULATION DE MONTE-CARLO

La fiabilité opérationnelle, ou disponibilité, d'un système correspond à sa probabilité de bon fonctionnement à l'instant courant. Celui-ci peut faire l'objet de divers processus de défaillance, de maintenance et de soutien logistique se déroulant simultanément. Sa modélisation devient alors particulièrement complexe et recouvre un grand nombre d'états qui ne peuvent être appréhendés que par la simulation de Monte-Carlo. Supportées par différents outils, des méthodes ont été développées pour en faciliter la mise en œuvre, telles que les réseaux de Petri stochastiques [4] et les modèles de simulation récursive [5], présentés succinctement dans le guide.

B. Facteur d'accélération

Les conditions d'utilisation et d'environnement impactent la fiabilité des composants et doivent être considérées dans les estimations. L'occurrence des différents modes de défaillance est accélérée par diverses covariables telles que la température, le courant, les vibrations ou l'humidité, par rapport à des conditions de référence. Mise à profit pour raccourcir la durées des essais d'endurance ou de fiabilité, cette accélération fait l'objet de modèles mathématiques dont les plus courants sont fondés sur le Modèle Standard de Vie Accélérée (SVA) qui fait l'hypothèse que seul le paramètre d'échelle de la loi de fiabilité ou de dégradation est modifié par le niveau de stress et que la forme de la distribution des défaillances reste inchangée.

Les principaux modèles d'accélération de type SVA sont :

- Arrhenius (température),
- Norris Landzberg (cyclage thermique),
- Peck (humidité)
- Basquin (vibrations),
- Eyring (thermoélectrique).

Ces modèles comprennent des paramètres a priori inconnus, tels que l'énergie d'activation de la loi d'Arrhenius, qui peuvent être estimés à partir de résultats d'essai ou de données de retour d'expérience acquis dans des conditions hétérogènes. Dans le cas d'un niveau de stress variable dans le temps, un facteur d'accélération équivalent peut être calculé par intégration selon le principe de Sedyakin [6]. Outre les modèles de type SVA, d'autres modèles d'accélération existent, tels que le modèle de Cox [7] utilisé en épidémiologie.

C. Recueil de fiabilité

Les recueils de fiabilité prévisionnelle fournissent une estimation du taux de défaillance en fonction du type de composant, de l'environnement et des conditions d'utilisation et d'approvisionnement. Le taux de défaillance de chaque type de composant est calculé à partir d'un taux de base constitué d'un ou plusieurs taux élémentaires (puce, boîtier, etc.), chacun corrigé par divers facteurs correctifs (température, environnement, qualité, approvisionnement, etc.). Ces recueils ne proposent, pour le moment, que des taux de défaillance constant, même pour des composants soumis à usure. La complexité de certains modèles rend difficile, voire impossible, l'estimation de leurs paramètres par ajustement à partir de données de retour d'expérience et conduit à s'interroger sur la validité des valeurs qui ont été choisies. De plus, les hypothèses considérées dans les différents recueils ne sont pas les mêmes. Les valeurs de taux de base, de température de référence et d'énergie d'activation diffèrent notamment entre les normes (TR 62380 IEC, Bellcore SR-332, MIL-HDBK-217F, FIDES), comme l'illustrent quelques comparaisons présentées dans le guide. Aussi, faut-il privilégier l'exploitation des données opérationnelles ou d'essais pour estimer la fiabilité d'un composant, quand cela est possible.

D. Composants non soumis à usure ¹

La fiabilité d'un composant non soumis à usure se caractérise par un taux de défaillance, ou un taux de panne à la sollicitation, constant.

Dans le cas d'un taux de défaillance, les données de retour d'expérience (données opérationnelles ou résultats d'essais) relatives à un type de composant se présentent sous la forme d'un nombre de pannes r observées pendant une durée cumulée de fonctionnement T. Le taux de défaillance peut être évalué par le rapport r/T, appelé estimation ponctuelle, ou estimé avec un niveau de confiance au moyen de la loi du khi-deux. Il est à noter que dans le cas le plus courant d'une période d'observation limitée dans le temps, correspondant à un essai tronqué sans remplacement, sa valeur n'est pas rigoureusement exacte mais constitue un majorant que l'on peut utiliser de manière conservative.

Dans le cas d'un taux de panne à la sollicitation, les données de retour d'expérience (données opérationnelles ou résultats d'essais) se présentent sous la forme d'un nombre k d'échecs observés au cours de n essais. L'intervalle de confiance du paramètre p d'une loi binomiale se calcule par résolution d'une équation au moyen d'un outil d'optimisation.

Les estimations sont généralement réalisées à 60 % de confiance dans le domaine de la fiabilité ou de la disponibilité et à 90 % quand elle concerne la sécurité des personnes et des biens.

E. Loi de fiabilité

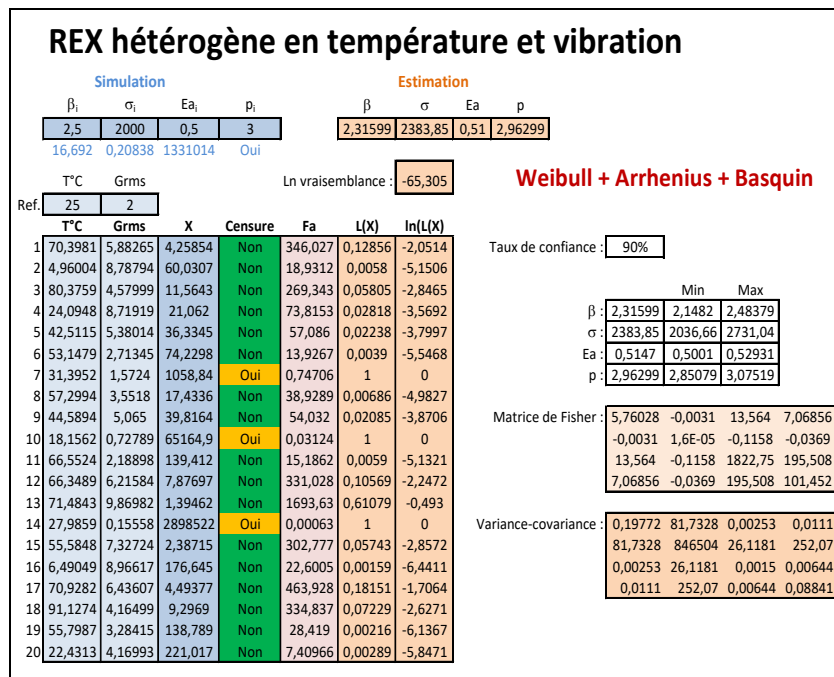


FIGURE 3 : AJUSTEMENT D'UNE LOI DE WEIBULL COUPLEE AUX MODELES D'ARRHENIUS ET DE BASQUIN

¹ Terme générique caractérisant la « détérioration par un usage prolongé » (*Le Robert*), l'usure définit également le mécanisme de dégradation engendré par le frottement entre deux pièces en mouvement.

Dans le cas où le niveau de dégradation n'est pas observable, les données de retour d'expérience d'un composant soumis à usure se limitent à une durée de fonctionnement par composant (données opérationnelles ou résultats d'essais). Outre l'utilisation de méthodes de modélisation non paramétrique telles que Kaplan-Meier, l'estimation consiste à choisir une loi de fiabilité adaptée au phénomène de dégradation (Weibull, lognormale...) et à procéder à son ajustement à partir des données observées. La méthode d'ajustement la plus couramment utilisée est celle du maximum de vraisemblance (*maximum likelihood*) qui consiste à rechercher la valeur des paramètres de la loi qui maximise la probabilité d'occurrence (ou densité de probabilité) des réalisations observées. Ces données sont censurées si la période d'observation ne recouvre pas la totalité de la durée de fonctionnement (censure à droite, à gauche ou par intervalles) et peuvent être acquises dans des conditions d'utilisation et d'environnement similaires ou hétérogènes.

Dans le cas de données hétérogènes et sous réserve d'utiliser un outil d'optimisation performant, il est possible de procéder à l'ajustement d'un modèle global de fiabilité accéléré, associant des lois de fiabilité et d'accélération, afin d'estimer en même temps l'ensemble des paramètres, comme l'illustre l'exemple de la figure 3. Traité par l'outil Gencab de Cab Innovation, ce modèle associe une loi de Weibull aux lois d'Arrhenius (température) et de Basquin (vibration).

Après ajustement, les paramètres recherchés (ou fonctions de ces paramètres) peuvent être estimés avec des intervalles de confiance asymptotiques, au moyen de la matrice de variance-covariance (inverse de la matrice de Fisher calculée par double dérivation de la log vraisemblance) [8], comme dans cet exemple. Le modèle ajusté permet alors d'estimer la fiabilité dans n'importe quelle condition de stress.

F. Loi de dégradation

Dans le cas où le niveau de dégradation est observable, le retour d'expérience est beaucoup plus conséquent puisqu'il recouvre des données multiples par composant (données opérationnelles ou résultats d'essais). Il est alors possible de quantifier la dégradation dans le temps, la modéliser et fixer un seuil limite de fonctionnement afin de pouvoir estimer le MTTF ou la durée de vie restante (*Remaining Useful Life : RUL*), comme l'illustre la figure 3.

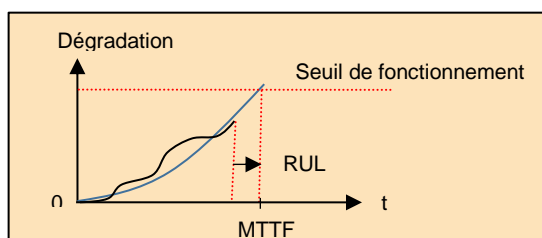


FIGURE 3 : MODELE DE DEGRADATION

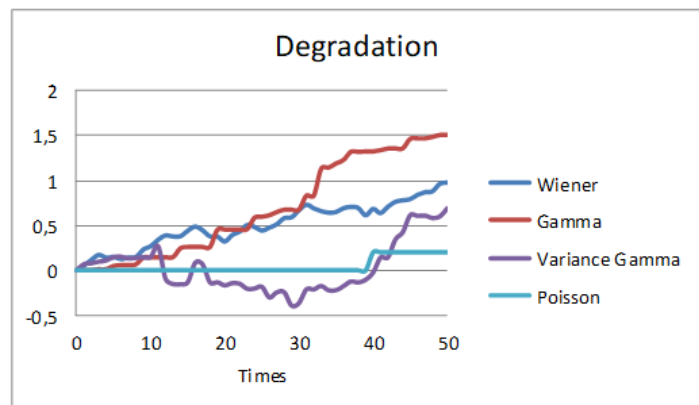


FIGURE 4 : PROCESSUS DE LEVY

Différents types de modèle peuvent être envisagés pour modéliser un phénomène de dégradation :

- les modèles explicatifs nécessitent de connaître précisément la physique des phénomènes,
- les modèles multi-états sont peu utilisés opérationnellement (modèles markoviens considérant des états de dégradation plus ou moins prononcés),
- les modèles issus de l'intelligence artificielle (réseaux de neurones...) sont utilisés en diagnostic (détection de signaux faibles ou de signatures caractéristiques) mais moins en pronostic qui requiert un apprentissage préalable de tous les comportements possibles dans toutes les conditions d'utilisation et d'environnement,
- les modèles continus portent sur une grandeur physique observable (largeur de fissure, courant de fuite, échauffement...) dont on cherche à décrire la trajectoire d'évolution.

Cette trajectoire peut être modélisée par des méthodes de régression ou par des processus de Lévy décrivant les caractéristiques aléatoires du phénomène, comme l'illustre la figure 4 :

- le processus gamma est monotone (croissant ou décroissant),
- le processus de Wiener est continu avec un bruit aléatoire et correspond à un mouvement brownien avec dérive.
- le processus de Poisson composé présente des sauts à différents instants,
- le processus Variance Gamma est discontinu et non monotone.

Ces processus sont dits stationnaires car ils sont caractérisés par des incréments indépendants qui ne dépendent que de la longueur de l'intervalle de temps h . Un changement de la variable temps permet cependant de les rendre non stationnaires, afin de considérer une variation de la vitesse moyenne de dégradation, et de les accélérer par différents facteurs pour tenir compte des conditions d'utilisation et d'environnement.

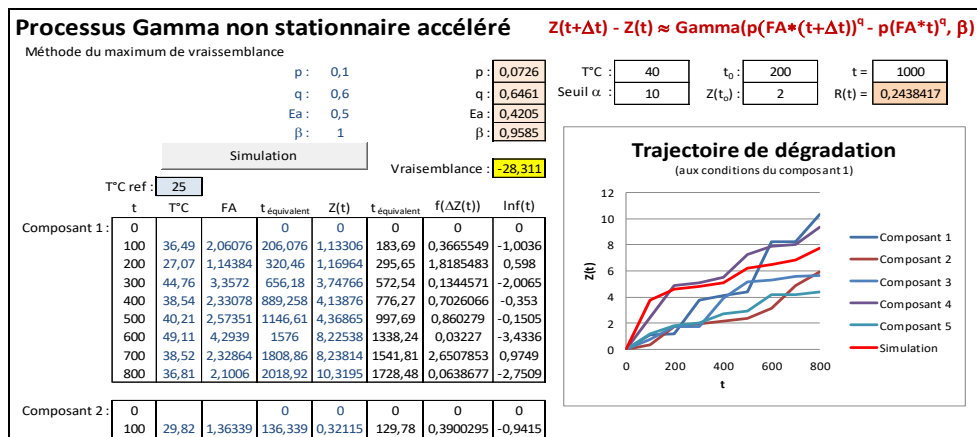


FIGURE 5 : AJUSTEMENT D'UN PROCESSUS GAMMA NON STATIONNAIRE ACCELERE

A titre d'illustration, l'exemple de la figure 5 porte sur l'estimation de la fiabilité d'un composant à différentes températures modélisée à partir de différentes trajectoires de dégradation observées sur cinq composants de même type dans des environnements évolutifs en température. Dans le cas d'un processus Gamma, la fiabilité, correspondant à la loi du premier franchissement d'un seuil α , et la RUL sont directement fournies par le modèle. Ces mêmes résultats peuvent être obtenus par une simulation de Monte-Carlo dans le cas des autres processus de Lévy. A partir de la courbe de fiabilité une loi équivalente (Weibull, lognormale...) au même seuil de dégradation acceptable, peut être obtenue par la méthode des moindres carrés.

G. Théorie des valeurs extrêmes

La théorie des valeurs extrêmes propose une méthode d'estimation des événements rares, tels que les crues, les tremblements de terre ou les raz-de-marée, qui peut également s'appliquer à la dégradation de composants soumis à des niveaux exceptionnels de radiation ou de flux de particules, lors d'éruptions solaires ou de phénomènes cosmiques.

Reposant sur l'exploitation de données de retour d'expérience, cette méthode consiste à approximer les queues de distribution selon deux approches :

- l'analyse des maxima par intervalles de temps fixes (valeurs maximales annuelles par exemple),
- l'analyse des valeurs au-dessus d'un seuil selon la méthode des dépassements ou POT (*Peak Over Threshold*).

La loi généralisée des extrêmes ou GEV (*Generalized Extreme Value*) est utilisée dans le premier cas et la loi généralisée de Pareto ou GPD (*Generalized Pareto Distribution*) dans la seconde.

Le traitement des données consiste à extraire des valeurs maximales périodiques pour la loi GEV et des valeurs supérieures au seuil choisi pour la loi GPD, puis d'ajuster ces lois par la méthode du maximum de vraisemblance.

Ces lois permettent alors d'estimer la probabilité que le phénomène étudié dépasse une certaine amplitude.

Mais la qualité de l'estimation ne repose que sur la représentativité des données du retour d'expérience et non pas sur l'ajustement dont les paramètres sont souvent estimés à 90 % de confiance.

A titre d'illustration, l'exemple de la figure 6 montre l'ajustement d'une loi GEV réalisé à partir d'un échantillon de 20 valeurs maximales annuelles parmi 100 qui ont été simulées au moyen d'une loi normale de moyenne 10 et d'écart-type égal à 2. La probabilité de non-dépassement d'un seuil au cours d'un siècle est correctement estimée par la loi GEV jusqu'à une valeur d'environ $+3\sigma$, mais apparaît dramatiquement sous-estimée au-delà en raison de la faiblesse de l'historique portant sur 20 années. Il apparaît, ainsi, illusoire de vouloir estimer des événements rares à partir d'un retour d'expérience qui ne porte pas trace de tels événements. La théorie des valeurs extrêmes doit être utilisée avec prudence.

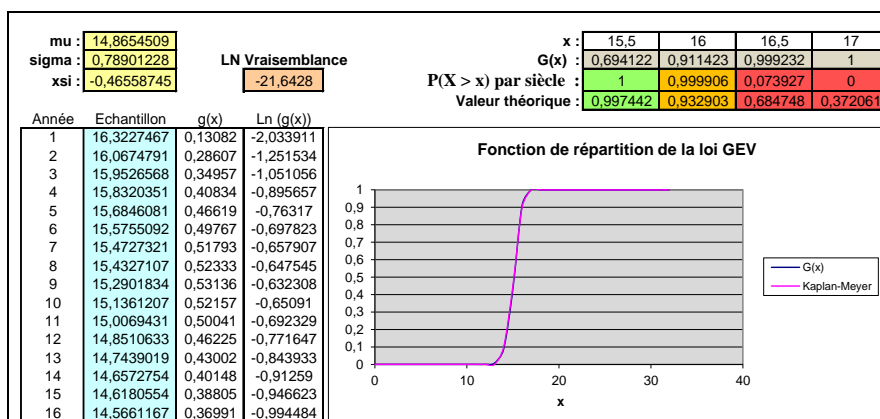


FIGURE 6 : AJUSTEMENT DE LA LOI GEV

H. Techniques bayésiennes

L'estimation fréquentielle consiste à rechercher la valeur d'un paramètre que l'on considère comme une quantité fixe (le taux de défaillance d'un composant par exemple), à partir de l'analyse de la fréquence des observations. L'inférence bayésienne consiste à réviser la probabilité d'une hypothèse par l'observation de faits.

L'estimation bayésienne considère le paramètre recherché comme une variable aléatoire dont les caractéristiques sont estimées à partir d'une connaissance a priori (un jugement d'expert par exemple) et des observations statistiques.

La fusion entre des informations a priori, traduites sous la forme d'une distribution statistique du paramètre à estimer, et des réalisations, transcrites en vraisemblance des observations (données opérationnelles ou résultats d'essais), résulte de l'application du théorème de Bayes dans le domaine continu, après discrétisation de la valeur du paramètre. La distribution a posteriori qui en résulte permet alors d'estimer un intervalle de confiance du paramètre fondé sur la totalité de l'information.

Ce calcul est relativement complexe mais est grandement facilité lorsque les lois a priori et a posteriori sont de même type. Ainsi, la loi bêta peut caractériser les distributions a priori et a posteriori de la probabilité p de la loi binomiale (taux d'échec ou de réussite), et la loi gamma peut caractériser les distributions a priori et a posteriori du taux de la loi de Poisson (taux de panne).

Outre la subjectivité des jugements d'experts, l'une des principales difficultés de la démarche réside dans la transcription de l'information a priori dans un modèle approprié, qui peut être réalisée :

- en estimant directement les paramètres d'une loi a priori, ce qui n'apparaît pas très réaliste,
- en remplaçant la connaissance a priori par un essai fictif, sachant que le nombre de défaillances considérées a une influence sur le poids de l'a priori par rapport aux observations,
- en établissant plusieurs conditions caractérisant la connaissance a priori afin de résoudre un système d'équations dont les inconnues sont les paramètres de la loi a priori.

Cette troisième méthode est notamment utilisée dans le domaine spatial pour consolider les taux de panne issus des recueils de fiabilité par des données de retour d'expérience, en considérant que les données des recueils sont représentatives, de manière générique, du quantile à 60 % et de l'espérance des taux de défaillance.

Les techniques bayésiennes permettent d'agréger des connaissances diverses mais leur application sans discernement peut conduire à des erreurs grossières :

- des méthodes ont été développées pour consolider les jugements entre différents experts, au risque de moyenniser l'absence de connaissance réelle,
- une méthode a été proposée pour dimensionner un essai fictif à partir de données issues d'équipements similaires [9], au risque de ne pas couvrir des fragilités particulières de l'équipement considéré.

Mais il est, en revanche, dommage de ne pas exploiter correctement la connaissance dont on dispose car elle constitue un avantage stratégique et peut permettre de réduire significativement le coût des essais.

I. Fiabilité mécanique

L'évaluation de la fiabilité d'un composant passif, tel qu'une cavité optique par exemple, relève d'une problématique de fiabilité mécanique dans laquelle une fonction doit être assurée dans un certain environnement (contrainte, choc, vibration, cyclage thermique...). L'estimation de fiabilité résulte alors davantage de l'analyse de la conception que de l'exploitation du retour d'expérience ou de la mise en œuvre d'essais.

Cette conception peut être fondée sur un dimensionnement déterministe ou probabiliste.

Dans le cas déterministe :

- le produit doit assurer une mission de référence (durée, nombre de cycles...) dans certaines conditions,
- les aléas et dispersions de toute nature sont couverts par des marges à travers des analyses de pire cas ou des coefficients de sécurité,
- La fiabilité du produit est généralement considérée égale à 1.

Les analyses de pire cas combinent des conditions extrêmes d'utilisation, d'environnement et d'interface qui peuvent conduire à un surdimensionnement pour absorber des pics de charge peu réalistes. Fondés sur le retour d'expérience, les coefficients de sécurité se veulent conservatifs mais ne garantissent pas toujours la maîtrise des dispersions.

Dans le cas probabiliste :

- la mission est aléatoire (demande fluctuante...) dans des conditions incertaines (environnement, état de dégradation des matériels...),
- les marges sont dimensionnées pour limiter la probabilité des événements redoutés, liés aux aléas et dispersions,
- La fiabilité du produit est la probabilité d'absence de tels événements au cours de la mission.

L'estimation de fiabilité peut être réalisée par :

- des calculs analytiques,
- la simulation de Monte-Carlo (avec ou sans réduction de variance),
- des méthodes de calcul fondées sur des variables préalablement transformées en variables gaussiennes (FORM-SORM...).

La fiabilité peut être calculée au moyen de formules analytiques dans des cas relativement simples, comme dans celui de la méthode Contrainte-Résistance utilisée pour calculer la probabilité de défaillance à la sollicitation d'un mécanisme, dans lesquels les variables sont considérées uniformes ou gaussiennes. Mais les variables issues d'un retour d'expérience ou d'essais n'ont pas de raison particulière d'être régies par ces lois.

Il est alors possible de transformer ces variables en variables gaussiennes par la transformation de Nataf et Rosenblatt [10] [11], ou de faire appel à la simulation de Monte-Carlo.

La simulation de Monte-Carlo permet de dimensionner des systèmes variés en simulant leur fonctionnement. Ainsi, l'exemple de la figure 7 porte sur le dimensionnement d'une cavité optique dont aucun rayon ne doit sortir après des réflexions multiples sur les deux miroirs.

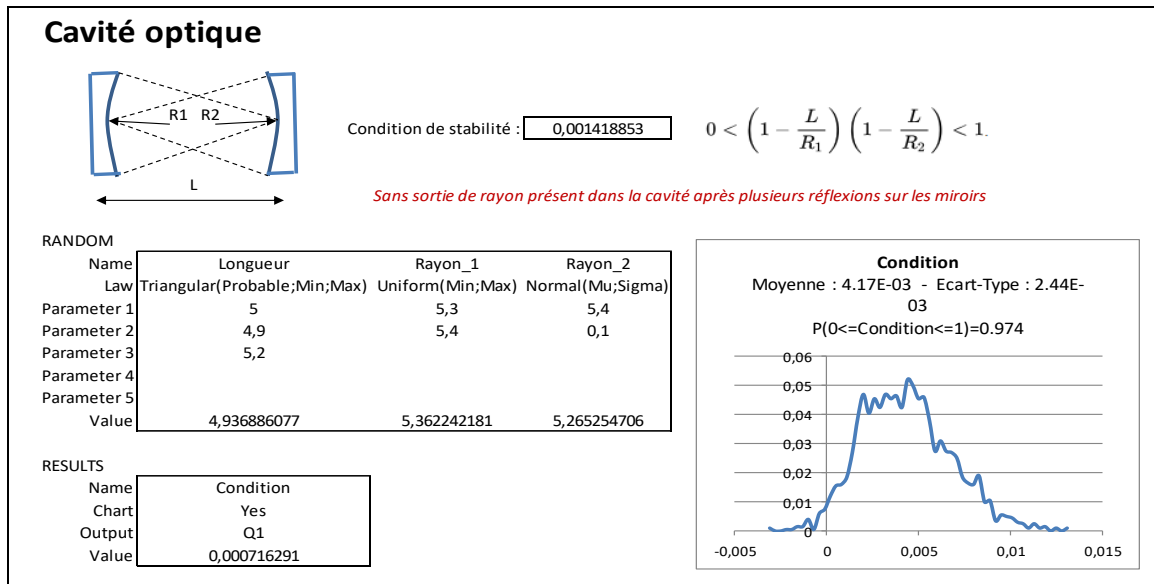


FIGURE 7 : SIMULATION DE MONTE-CARLO D'UNE CAVITE OPTIQUE

La précision des résultats peut être améliorée par des techniques de réduction de variance, telles que l'échantillonnage stratifié (*importance sampling*) ou l'échantillonnage d'importance (*importance sampling*²) illustrés par la figure 8, qui consistent à privilégier un domaine d'intérêt lors des simulations (une zone de défaillance probable ...) puis de pondérer les résultats obtenus par application du théorème des probabilités totales. Ainsi l'échantillonnage d'importance (*importance sampling*) utilise une fonction d'importance pour encourager les tirages dans les zones que l'on cherche à privilégier, comme l'illustre l'exemple de la figure 9 portant sur la méthode Contrainte-Résistance.

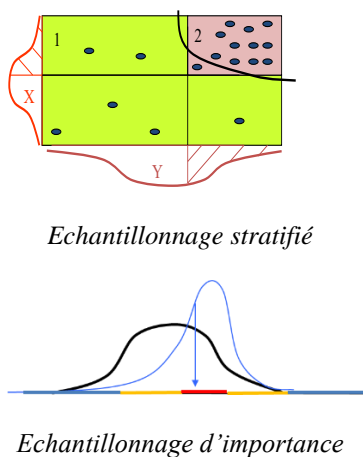


FIGURE 8 : REDUCTION DE VARIANCE

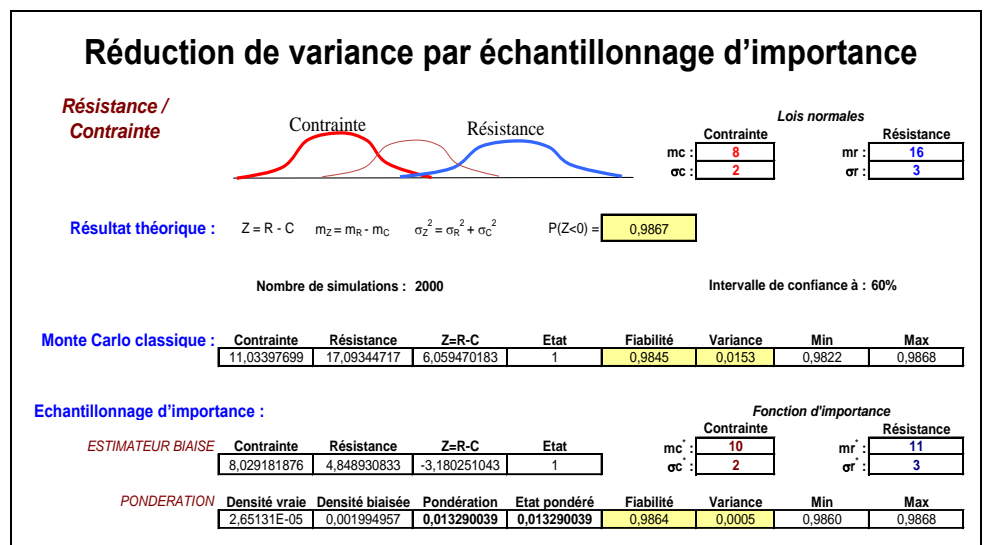


FIGURE 9 : ECHANTILLONNAGE D'IMPORTANCE APPLIQUE A LA METHODE CONTRAINTE-RESISTANCE

² Également traduit par le terme « échantillonnage préférentiel » dont le sens peut également recouvrir l'échantillonnage stratifié.

Illustrée par la figure 10, la méthode FORM-SORM [12] [13] [14] est une méthode d'estimation de la fiabilité qui généralise le principe de la méthode Contrainte-Résistance dans un espace de variables multiples préalablement transformées en variables normales centrées réduites.

Le fonctionnement d'un produit dépend de divers facteurs de charge (solicitations, température, humidité, tension, intensité...) et de fabrication (dimensions, matière...).

Ces facteurs sont des variables aléatoires à partir desquelles il est parfois possible de définir une inégalité $g(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0$ qui coupe l'espace en deux domaines, l'un de bon fonctionnement et l'autre de défaillance.

La vraisemblance d'une réalisation est égale au produit des densités de probabilité des variables aléatoires et son maximum correspond au point le plus probable. Le point où la vraisemblance est maximale dans le domaine de défaillance est le point de défaillance le plus probable, appelé point de conception.

La probabilité de défaillance est l'intégrale de la vraisemblance dans la zone de défaillance dont la solution analytique est généralement impossible à calculer. La méthode FORM-SORM cherche à trouver le point de conception pour déterminer une valeur approchée de la probabilité de défaillance.

Appelée indice de fiabilité β , la distance du point de conception à l'origine se calcule en minimisant cette distance pour l'ensemble des points satisfaisant la contrainte d'égalité en limite de bon fonctionnement, au moyen d'un algorithme d'optimisation.

La méthode FORM (*First Order Reliability Method*) approxime la surface frontière à la zone de défaillance à un (hyper) plan passant par le point de conception et perpendiculaire à la droite passant par ce point et l'origine. La probabilité de défaillance se calcule alors simplement par l'expression $PF = \Phi(-\beta)$ où Φ est la fonction de répartition de la loi normale centrée réduite. La méthode SORM (*Second Order Reliability Method*) est similaire à la méthode FORM mais moins conservative car elle considère une approximation du second ordre pour déterminer la probabilité de défaillance.

A des fins d'illustration et de comparaison des différentes méthodes, un exemple simple de dimensionnement mécanique, portant sur une brouette ne devant pas dépasser une force réglementaire F à l'utilisation, est proposé à la figure 11.

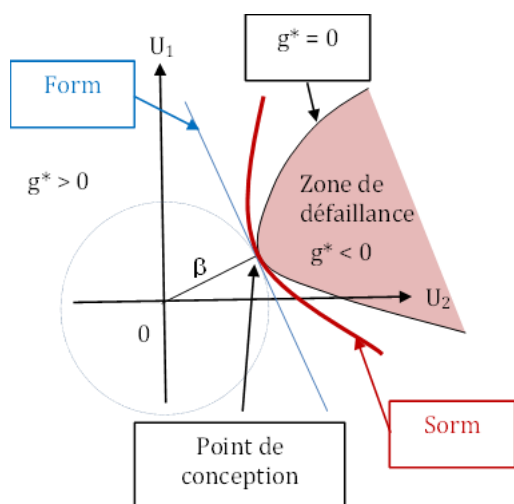


FIGURE 10 : METHODE FORM-SORM

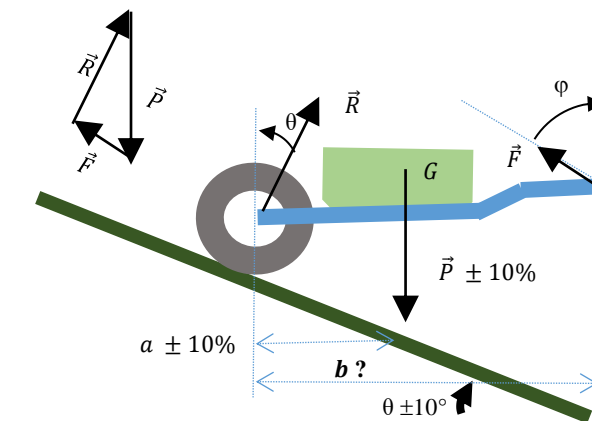


FIGURE 11 : DIMENSIONNEMENT D'UNE BROUETTE

Son dimensionnement est réalisé successivement :

- en valeur moyenne,
- en prenant un coefficient de sécurité,
- en pire cas,
- par une simulation de Monte-Carlo classique,
- en employant la technique de réduction de variance par échantillonnage d'importance,
- en utilisant la méthode FORM.

J. Mise en œuvre des essais

Les essais de fonctionnement opérationnel permettent d'évaluer la capacité d'un produit à assurer sa mission (essais d'endurance) en fournissant une estimation de la probabilité de réussite dans le cas des essais de fiabilité.

Ces derniers sont généralement onéreux et leur réalisation est un processus aléatoire qui peut se dérouler différemment que prévu. L'objectif de fiabilité attendue peut ne pas être démontré (notamment en cas de performance insuffisante du produit) ou nécessiter une prolongation des essais ou l'ajout de pièces en test. Les essais sont généralement accélérés pour réduire leur durée et/ou le nombre de pièces en essais, et diminuer, par là-même, leur coût.

L'optimisation des essais peut porter sur leur dimensionnement préliminaire ou leur planification.

- Le dimensionnement préliminaire concerne notamment :
 - le nombre de pièces à tester et la durée des essais,
 - le type d'essai (à zéro ou n pannes escomptées),
 - l'observabilité durant les essais,
 - les conditions de stress en essais.
- La planification des essais concerne notamment :
 - la stratégie (préétablie ou élaborée en fonction des résultats observés),
 - l'emploi de méthode de planification optimale (D-Optimalité).

L'exemple de la figure 12 porte sur le nombre de pièces à tester minimisant le coût d'un essai d'un composant à taux de défaillance constant, à zéro panne escomptée ou plusieurs pannes attendues, en considérant des essais plus ou moins accélérés.

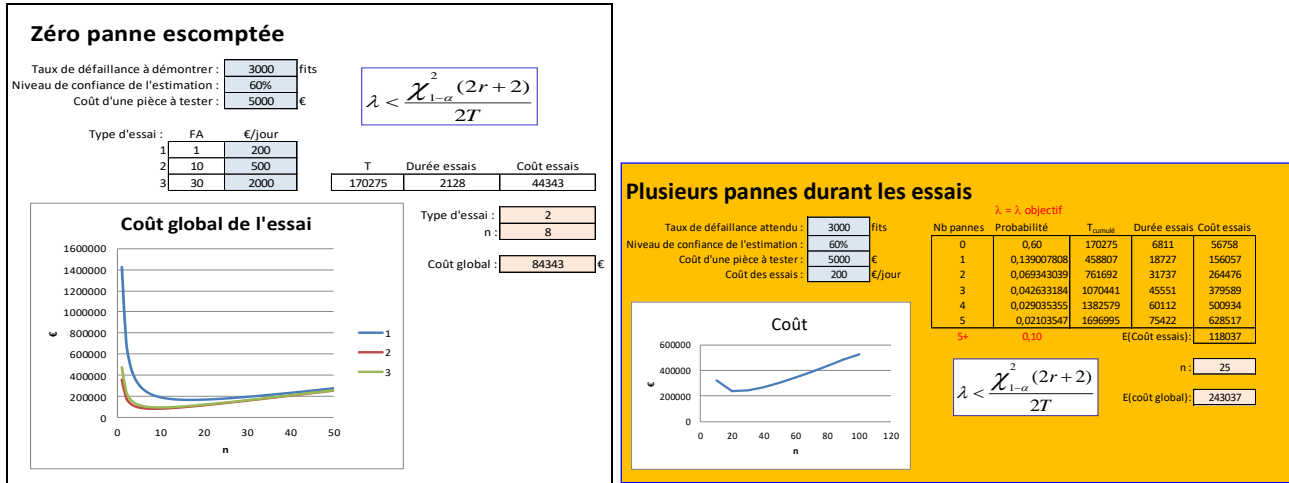


FIGURE 12 : ESSAI D'UN COMPOSANT SANS USURE

Le risque de défaillance, et donc d'échec de l'essai, est ici voisin de 40 % (1 - β) si le taux de panne du composant est proche de l'objectif à démontrer.

Dans le cas d'un composant soumis à usure, l'estimation peut être réalisée de manière conservative, au moyen de la loi binomiale, en testant chacune des pièces pendant toute la durée de la mission. L'exemple de la figure 13 donne ainsi le nombre de pièces à tester pour démontrer un objectif de fiabilité en fonction du nombre de pannes observées durant les essais.

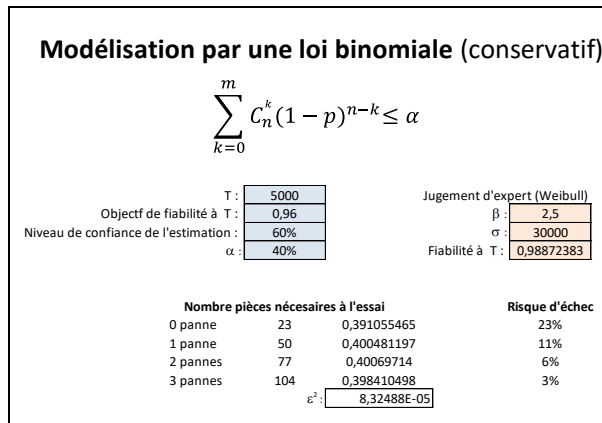


FIGURE 13 : ESSAI D'UN COMPOSANT AVEC USURE

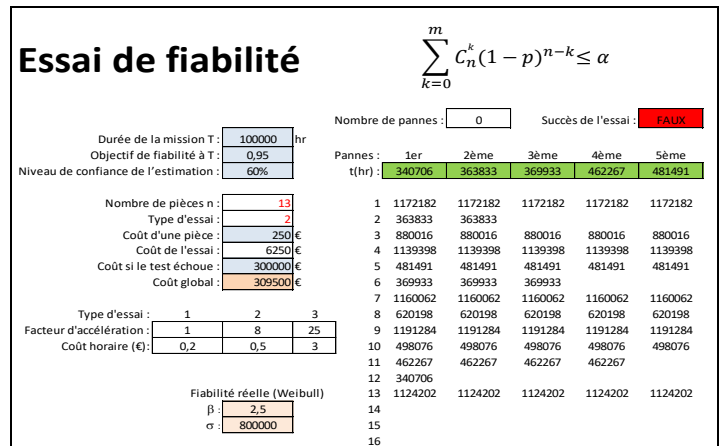


FIGURE 14 : OPTIMISATION COUPLEE A UNE SIMULATION DU PROCESSUS D'ESSAI

Outre ces exemples relativement simples, une optimisation des paramètres d'essai peut être également réalisée en couplant un outil d'optimisation à une simulation de Monte-Carlo du processus d'essai, comme l'illustre l'exemple de la figure 14.

Les essais ne peuvent être accélérés que si :

- ils sont menés dans le domaine de qualification du produit, afin de révéler les mêmes phénomènes de défaillance ou de dégradation que dans les conditions nominales,
- les lois d'accélération permettant de passer des conditions opérationnelles (profil de vie) aux conditions d'essai, et inversement, sont connues.

Différentes stratégies d'essai peuvent être envisagées :

- lots de pièces testés chacun à différents niveaux de stress (onéreux),
- augmentation progressive ou échelonnée des niveaux de stress selon l'apparition des défaillances ou la vitesse de dégradation observée (stratégie exploratoire),
- réduction des niveaux de stress en partant des conditions de stress maximales, afin de minimiser la durée des essais,
- essais séquentiels ou par lots définis selon différents critères (D-optimalité...), etc.

La planification optimale consiste à modifier les caractéristiques des essais en cours de réalisation, les conditions de stress par exemple, au moyen d'une stratégie préétablie ou élaborée en fonction des résultats des tests réalisés.

La méthode la plus employée dans le domaine des plans d'expériences est la D-optimalité qui consiste à minimiser la variance des estimateurs en maximisant le déterminant de la matrice de Fisher, obtenue par dérivation de la log vraisemblance puis calcul de son espérance à partir des essais déjà réalisés et des essais à planifier (conditions et résultats).

Ces calculs sont relativement complexes [15] sauf si on fait l'hypothèse que la courbe de fiabilité ou de dégradation peut être approchée par un modèle linéaire, comme dans l'exemple à 3 covariables de la figure 15 pour lequel la configuration des 23 premiers essais, puis celle des 5 essais complémentaires, ont été obtenues par la méthode D-optimale.

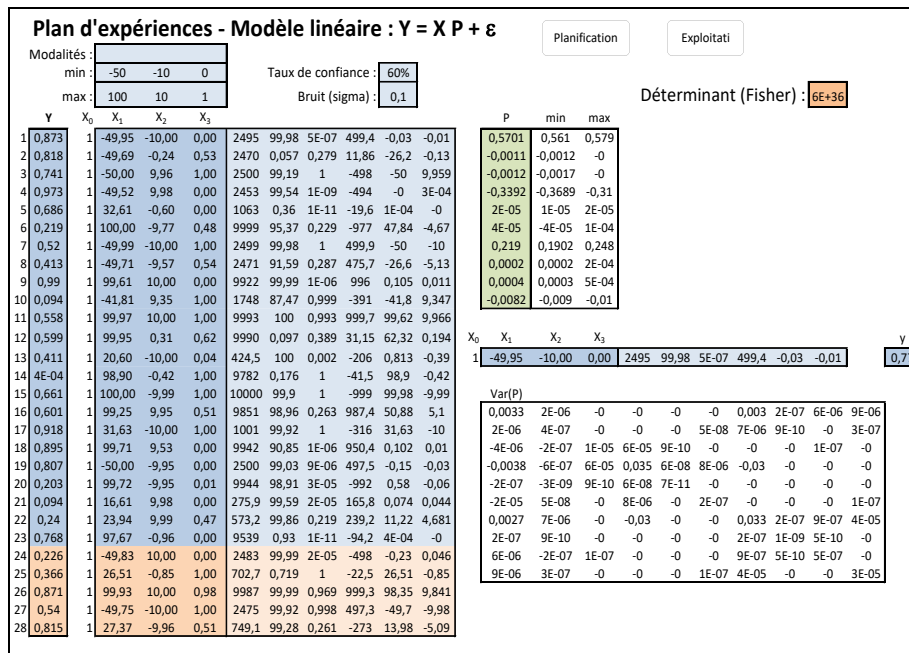


FIGURE 15 : PROCESSUS D'ESSAI D'UN SYSTEME MONOCOUP

Les systèmes monocoups regroupent les produits dont le fonctionnement est limité à une seule utilisation. 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. Illustrés par la figure 16, des essais spécifiques sont mis en œuvre pour estimer leur fiabilité en faisant l'hypothèse que la distribution du seuil de fonctionnement suit une loi normale ou lognormale en fonction du paramètre fonctionnel. Différentes méthodes de planification, plus ou moins consommatrices en pièces à tester, peuvent être mises en œuvre, telles que One-shot, Bruceton, Probits, dont deux fondées sur la D-optimalité : Neyer et Caboum [16].

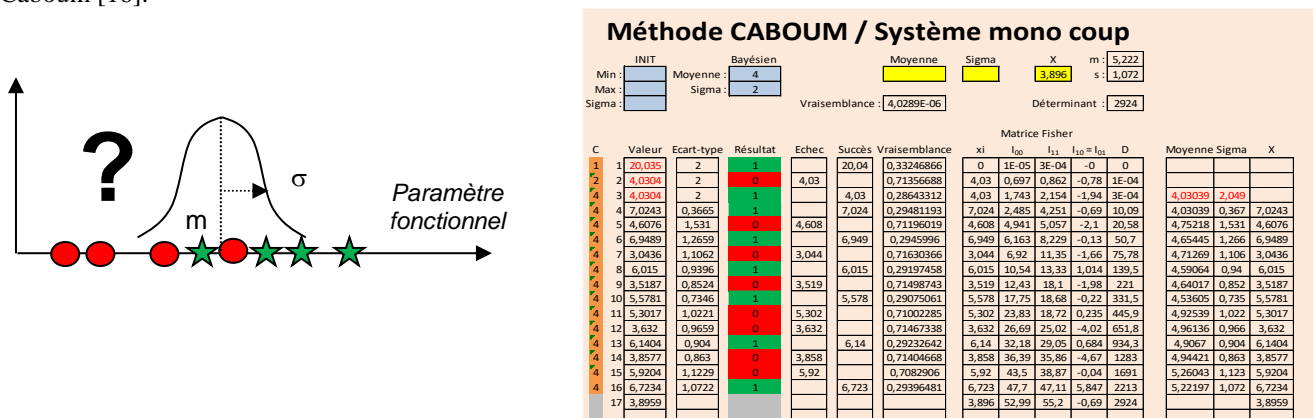


FIGURE 16 : PROCESSUS D'ESSAI D'UN SYSTEME MONOCOUP

IV. CONCLUSION

Développé à l'origine dans le domaine spatial pour répondre à un besoin spécifique d'évaluation des composants optoélectroniques, ce guide pratique d'estimation de la fiabilité est devenu générique et multisectoriel. Recouvrant la plupart des produits existants, il se veut précis mais synthétique (108 pages) afin de donner immédiatement aux lecteurs l'information nécessaire à la bonne résolution de sa problématique, sans nécessité de prérequis. Il propose la méthode la plus adaptée à chaque situation, avec une description claire et synthétique de son principe et de ses limitations et la délivrance systématique d'un exemple d'application sous Excel (les fichiers de calcul des 32 exemples présentés sont fournis avec le guide).

Dans un contexte de réindustrialisation, parfois rendu difficile par des pertes de connaissance et de savoir-faire, ce guide devrait trouver sa place auprès des concepteurs, qui ne disposent pas tous de la culture de la fiabilité, pour réaliser des produits fiables et économes en ressources. En posant un regard critique sur les divers méthodes et outils à disposition, en explicitant leurs principes, domaines d'application et limitations, et en s'appuyant sur des exemples d'application transparents en termes de calcul, il offre un "garde-fou" méthodologique susceptible d'éviter les erreurs trop souvent rencontrées dans notre métier. Il s'appuie, par ailleurs, sur les nombreuses publications scientifiques et ouvrages de référence rédigés par ses auteurs.

Le guide peut s'accompagner de cours enregistrés de formation qui couvrent l'ensemble des domaines de la Sûreté de Fonctionnement, de la simulation et de la conception optimale (40 vidéos de formation de moins de 10 minutes accessibles via Internet). Actuellement disponible au format B5 (figure 17) ou A5 (version de poche), il pourrait faire l'objet d'une version en langue anglaise afin de faciliter les échanges entre les acteurs à l'international.

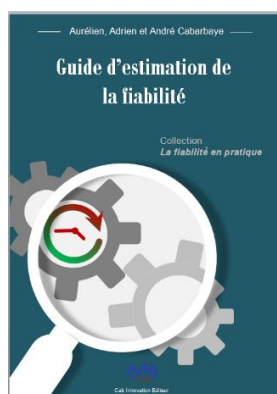


FIGURE 17 : GUIDE D'ESTIMATION DE LA FIABILITE - ISBN : 979-10-97287-15-3

REFERENCES

- [1] Cabarbaye A., A. & A., La fiabilité aujourd'hui, ISBN 979-10-97287-12-2
- [2] Cabarbaye A., A. & A., Mise en œuvre des essais accélérés et de la maintenance prédictive, ISBN 979-10-97287-13-9
- [3] Cabarbaye A., A. & A., Conception optimale déterministe et probabiliste, ISBN 979-10-97287-14-6
- [4] Norme CEI 62551:2012, Techniques d'analyse de sûreté de fonctionnement - Techniques des réseaux de Petri, 2012.
- [5] Cabarbaye A., Laulheret R., Traitement de la fiabilité dynamique et des systèmes hybrides par modélisation récursive, QUALITA 2005, Bordeaux, 2005.
- [6] Sedyakin N.M., On one physical principle in reliability theory, Proceedings of Academy of Sciences of USSR, Technical Cybernetics, 3, 80-87, 1966.
- [7] Cox D.R., Regression models and life tables, Journal of the Royal Statistical Society, series B, vol 34, n°2, 1972, pages 187-220.
- [8] Cabarbaye A., Tanguy A., Bosse S., Adjustment of complex probabilistic models and estimation of confidence intervals in a discrete manner, ESREL 2012.
- [9] Ringler J. - Réduction des coûts d'essais de fiabilité par la pratique des techniques bayésiennes, Colloque International sur la Fiabilité et la Maintenabilité, Paris juin 1978.
- [10] Nataf A., Détermination des distributions dont les marges sont données, C. R. Acad. Sci. Paris 225, 42-43 (1962).
- [11] Rosenblatt M., Remarks on a multivariate transformation, The Annals of Mathematical Statistics 23, 470-472 (1952).
- [12] Lemaire M., en collaboration avec Chateauneuf A. et Mitteau J.-C., Fiabilité des Structures – couplage mécano-fiabiliste statique, Collection Génie Civil, Hermès/Lavoisier, 2005.
- [13] Ardillon E. & al., « Méthode FORM », fiche « Méthode » de l'IMdR, document produit par le groupe de travail Sécurité et Sûreté des Structures de l'IMdR. Téléchargeable gratuitement depuis l'adresse suivante : https://www.imdr.eu/shop_818-47328-5300-835/fiche-methode-methode-de-fiabilite-du-premier-ordre.html, 2015
- [14] Lemaire M., Ardillon E., "Analyses de Fiabilité des Structures," Article publié dans la Bibliothèque Virtuelle de l'AFNOR, 2018
- [15] Cabarbaye A., Pouligny M., Etcheverry C., Bosse S., Méthode Générique de planification optimale des essais de fiabilité et de dégradation, Lambda mu 20, Saint-Malo, 11-13/10/2016.
- [16] Etcheverry C., Pouligny M., Bosse S., Cabarbaye A., Amélioration de la méthode Neyer d'estimation de fiabilité des systèmes mono coup utilisée en pyrotechnie, Lambda mu 20, 2016.