

— André Cabarbaye —

**VERSION ENRICHIE**

# Mise en œuvre des essais accélérés

Collection  
*La fiabilité en pratique*



Cab Innovation Editeur

# Collections

## *La fiabilité en pratique*

(Prochainement disponible en anglais)

- Maitrise des risques & fiabilisation des systèmes
- L'estimation en Sureté de Fonctionnement
- Modélisation, évaluation et optimisation en Sureté de Fonctionnement
- De la quantification du risque à l'optimisation des systèmes (regroupe le contenu des deux précédents ouvrages)
- Sureté de Fonctionnement & optimisation des systèmes (regroupe le contenu des trois premiers ouvrages)
- Mise en œuvre des essais accélérés

**Du même éditeur :**

## *L'ingénierie en pratique*

(Prochainement disponible en anglais)

- L'optimisation multidisciplinaire, l'autre enjeu du Big Data

CAB INNOVATION, 2019

« Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayant droit ou ayant cause est illicite (loi du 11 mars 1957 alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40). Il en est de même pour la traduction, l'adaptation ou la transformation, l'arrangement ou la reproduction par un art ou un procédé quelconque. »

A tous ceux qui ont contribué à l'enrichissement de ce guide

# Préface

Performance et fiabilité sont les deux piliers qui devraient sous-tendre le développement de toute nouvelle technologie car un produit performant mais peu fiable n'a guère plus d'avenir qu'un produit fiable mais de faible performance. S'il est relativement aisé de démontrer qu'une technologie est fonctionnellement plus performante qu'une autre, qu'en est-il de sa fiabilité ? Comment la quantifier ? Comment justifier qu'elle est bien conforme aux exigences opérationnelles ? Comment dimensionner les essais nécessaires à cette justification tout en optimisant leur coût et leur durée ?

Autant de questions qui peuvent rester sans réponse satisfaisante sans la maîtrise de certains concepts rarement enseignés à l'université ou en école d'ingénieurs mais qui jouent pourtant un rôle essentiel dans la fiabilisation d'un produit tout au long de son cycle de vie. De ce point de vue, les essais accélérés tiennent une place prépondérante car ils permettent, en théorie, une caractérisation relativement rapide et à moindre coût de la fiabilité d'un produit en accélérant son vieillissement. Cependant, le dimensionnement puis l'analyse des résultats de ces essais sont bien souvent effectués de manière empirique en s'appuyant sur des normes ou des modèles dont le domaine d'application n'est pas toujours bien défini.

Aussi faut-il féliciter André Cabarbaye Expert Senior en Sécurité de Fonctionnement d'avoir écrit ce guide didactique donnant un cadre clair et précis à la planification et à l'exploitation des résultats d'essais accélérés. Après des rappels de base en probabilité et statistique, l'auteur présente les hypothèses sous-tendant le modèle standard de vie accélérée ainsi que les lois d'accélération usuellement rencontrées en électronique et en mécanique. Les différents types d'essais accélérés sont ensuite présentés ainsi que leur logique de dimensionnement. Enfin, le dernier chapitre de cet ouvrage aborde la question cruciale de l'optimisation des essais afin d'en diminuer le coût ou d'en améliorer la précision des résultats.

Nul doute que ce guide constituera un recueil particulièrement utile aux fiabilistes mais aussi à tous ceux qui dans leur pratique souhaitent mettre en œuvre des essais de fiabilité en utilisant l'état de l'art des techniques de dimensionnement et d'exploitation.

Olivier Gilard

*Expert composants optoélectroniques au Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)*

# Table des matières

<b>Préface</b> .....	<b>7</b>
<b>Table des matières</b> .....	<b>9</b>
<b>Avant-propos</b> .....	<b>13</b>
<b>1. Introduction</b> .....	<b>15</b>
<b>2. Fondements théoriques</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1. Rappel de probabilité et statistique</b> .....	<b>17</b>
2.1.1. Probabilité et opérations logiques .....	17
2.1.2. Théorème des probabilités totales et théorème de Bayes .....	18
2.1.3. Variable aléatoire .....	20
2.1.4. Principales caractéristiques de la fiabilité .....	22
2.1.4.1. Fiabilité .....	22
2.1.4.2. Durée de vie .....	22
2.1.4.3. Taux de défaillance .....	23
2.1.5. Modèle non paramétrique (Kaplan Meier) .....	26
2.1.6. Lois de probabilité .....	27
2.1.6.1. Loi exponentielle .....	27
2.1.6.2. Loi de Weibull .....	27
2.1.6.3. Loi normale (Laplace-Gauss) .....	29
2.1.6.4. Loi log-normale (Galton) .....	29
2.1.6.5. Loi Binomiale .....	29
2.1.6.6. Loi de Poisson .....	30
2.1.7. Estimation .....	30
2.1.7.1. Intervalle de confiance .....	31
2.1.7.2. Intervalle de confiance d'une valeur moyenne .....	31
2.1.7.3. Intervalle de confiance d'une probabilité de défaillance .....	32
2.1.7.4. Intervalle de confiance d'un taux de défaillance .....	32
2.1.8. Ajustement d'un modèle probabiliste .....	33
2.1.8.1. Maximum de vraisemblance .....	33
2.1.8.2. Intervalle de confiance asymptotique .....	36
2.1.8.3. Précision d'un ajustement .....	38
2.1.8.4. Adéquation et test statistique .....	39
2.1.9. Simulation de Monte-Carlo .....	42
2.1.9.1. Principe .....	42
2.1.9.2. Simulation d'une variable aléatoire .....	43
2.1.9.3. Précision des résultats .....	44

2.1.10.	Inférence bayésienne .....	45
2.1.10.1.	Démarche fréquentielle et bayésienne .....	45
2.1.10.2.	Lois conjuguées.....	46
2.1.10.3.	Lois quelconques .....	49
<b>2.2.</b>	<b>Modèles de fiabilité .....</b>	<b>50</b>
2.2.1.	Modèles de composants .....	50
2.2.2.	Fiabilité de blocs indépendants en série ou parallèle.....	52
2.2.3.	Systèmes markoviens (sans usure).....	54
2.2.4.	Systèmes non markoviens.....	56
<b>2.3.</b>	<b>Modèles d'accélération .....</b>	<b>58</b>
2.3.1.	Modèles Standard de Vie Accélérée (SVA).....	58
2.3.2.	Lois d'accélération .....	60
2.3.2.1.	Loi d'Arrhenius (thermique).....	60
2.3.2.2.	Loi de Norris Landzberg (cyclage thermique) .....	62
2.3.2.3.	Loi de Peck (humidité).....	63
2.3.2.4.	Loi de Basquin (vibration) .....	63
2.3.2.5.	Loi d'Eyring (thermoélectrique).....	65
2.3.2.6.	E-model (panne de diélectrique) .....	65
2.3.2.7.	Modèle d'accélération lié aux rayons cosmiques .....	66
2.3.2.8.	Lois d'accélération et mécanismes de défaillance .....	66
2.3.3.	Prise en compte de stress variables (principe de Sedyakin) .....	68
2.3.4.	Autres modèles d'accélération.....	69
2.3.5.	Ajustement d'un modèle de fiabilité accéléré .....	70
<b>2.4.</b>	<b>Modèle de dégradation.....</b>	<b>72</b>
2.4.1.	Dégradation croissante monotone (processus Gamma).....	73
2.4.2.	Dégradation non monotone (processus de Wiener).....	76
2.4.3.	Modèle à dégradation instantanée (choc) .....	78
<b>3.</b>	<b>Les Essais.....</b>	<b>79</b>
<b>3.1.</b>	<b>Les différents types d'essais .....</b>	<b>79</b>
3.1.1.	Essais accélérés .....	79
3.1.2.	Essais aggravés (HALT).....	80
3.1.3.	Essais de déverminage (HASS).....	80
3.1.4.	Essais d'endurance .....	81
3.1.5.	Essais de fiabilité .....	81
<b>3.2.</b>	<b>Testabilité des produits.....</b>	<b>81</b>
<b>3.3.</b>	<b>Conditions d'accélération des essais.....</b>	<b>83</b>
<b>4.</b>	<b>Mise en œuvre des essais accélérés.....</b>	<b>85</b>

4.1.	Questions préalables à se poser avant les essais .....	85
4.2.	Du composant au produit.....	86
4.3.	Du profil de vie aux conditions d'essais.....	88
4.4.	Processus de mise en œuvre.....	89
4.4.1.	En l'absence de phénomène d'usure .....	90
4.4.2.	En présence de phénomène d'usure.....	92
4.4.3.	Avec des facteurs d'accélération inconnus.....	93
4.4.4.	Stratégies d'évolution des stress en essais.....	94
4.4.5.	Exploitation de données hétérogènes.....	95
4.4.5.1.	Cas d'un modèle de fiabilité.....	95
4.4.5.2.	Cas d'un modèle de dégradation .....	97
4.4.6.	Démonstration de la tenue d'un objectif de fiabilité .....	99
4.4.7.	Prise en compte d'une connaissance a priori.....	99
4.5.	Cartes électroniques .....	102
4.6.	Equipements mécaniques.....	105
5.	<b>Dimensionnement optimal des essais.....</b>	<b>108</b>
5.1.	Dimensionnement avant essais .....	109
5.2.	Planification durant les essais.....	110
5.2.1.	D-Optimalité .....	111
5.2.2.	Méthode Caboum .....	114
5.2.3.	Distribution homogène des conditions d'essais.....	118
5.3.	Optimisation globale d'une campagne d'essais .....	118
6.	<b>Conclusion .....</b>	<b>121</b>
	<b>Bibliographie .....</b>	<b>123</b>
	<b>Table des illustrations .....</b>	<b>129</b>

## Avant-propos

Si les modèles d'accélération intéressent les brasseurs dont la production de bière dépend des conditions climatiques (température, humidité...) et chocs événementiels (matches de foot...), ils ne peuvent pas être ignorés des concepteurs et utilisateurs de produits, tant les conditions environnementales et d'usages influencent leur fiabilité.

Une voiture ne vieillira pas de la même manière en Norvège ou au Sahara et si elle est conduite par une personne âgée ou par ses petits-enfants.

Permettant de passer d'une condition de stress à une autre, le facteur d'accélération apparaît quelque peu magique. Mais, il n'est pas l'apanage de quelques experts obscurs et repose sur des hypothèses qu'il est nécessaire d'explicitier et de confronter aux données opérationnelles ou aux données d'essai pour être validées.

Sa justesse s'impose pour démontrer, dans un délai réduit et au minimum de coût, la capacité opérationnelle des produits à assurer leur mission, dans le cadre des essais d'endurance ou de fiabilité.

Une mauvaise évaluation de l'influence des stress aboutit, soit à des résultats optimistes en essai qui ne se concrétiseront pas durant la vie opérationnelle, soit à des conditions trop sévères en essai qui conduiront à l'impasse ou à des prolongations coûteuses.

De même, elle conditionne les estimations de fiabilité prévisionnelle et celles de pronostic de potentiel restant (RUL : Remaining Useful Life) dans le cadre du Health Monitoring et de la maintenance prédictive imposés dorénavant par la plupart des opérateurs de systèmes.

Mais si le diagnostic a beaucoup profité des capacités du Big data (notamment pour détecter des signaux faibles), le pronostic reste une activité encore largement balbutiante.

Il nécessite, en effet, de disposer de modèles de fiabilité ou de dégradation dans des conditions d'utilisation et d'environnement variées, qui ne peuvent être établis qu'à partir d'un retour d'expérience conséquent généralement tardif.



Or ces mêmes modèles peuvent également résulter des essais accélérés réalisés en fin de conception. Répondant à un double objectif, ces derniers se trouvent alors grandement valorisés et leur coût d'autant plus facile à justifier.

Mais outre les difficultés de modélisation de la fiabilité, la testabilité et notamment l'observabilité des dégradations en présence de phénomènes d'usure est une dimension trop souvent oubliée des concepteurs, alors qu'elle assure la faisabilité des essais (ainsi que du diagnostic en ligne) et peut sensiblement en réduire les coûts.

Cette version enrichie d'un guide de mise en œuvre des essais accélérés a bénéficié des remarques et commentaires d'industriels impliqués que nous remercions vivement.

# 1. Introduction

---

Le stress augmente le risque de défaillance, aussi est-il considéré dans les modèles de fiabilité.

Mais, il est également exploité dans le cadre des tests d'endurance ou de fiabilité pour réduire la durée des essais et/ou le nombre de pièces à tester en augmentant les niveaux de stress par rapport à ceux de la vie opérationnelle (température, vibration, humidité...).

Cette ingénieuse utilisation des conditions d'utilisation et d'environnement impose cependant deux exigences :

- l'augmentation des contraintes doit être limitée pour ne pas révéler d'autres phénomènes de défaillance ou de dégradation durant les essais que ceux qui seront observés en conditions nominales,
- les lois d'accélération permettant de passer des résultats d'essais aux performances opérationnelles doivent être parfaitement établies pour pouvoir démontrer la capacité réelle des produits.

Cette modélisation de phénomènes physiques impose de revenir aux fondements théoriques des essais accélérés, qui sont développés dans la première partie de cet ouvrage, sans manquer de faire un court détour par les bases des probabilités et statistiques.

Les différents types d'essais sont alors présentés avec, pour chacun d'entre eux, leur domaine d'application et conditions de réalisation respectives.

Un guide de mise en œuvre des essais accélérés est ensuite proposé afin de vulgariser les pratiques selon les situations d'essai rencontrées :

- au niveau du composant ou d'un ensemble regroupé en produit,
- en présence ou absence de phénomènes d'usure,
- avec ou sans connaissance précise des lois d'accélération, etc.

Des méthodes d'optimisation du dimensionnement et de la planification des essais accélérés font enfin l'objet d'une dernière partie. Celles-ci tentent de réduire le coût et la durée d'une activité

stratégique permettant de démontrer la capacité opérationnelle des produits et de fournir des modèles de comportement en exploitation, dans une économie tournée de plus en plus vers le service.

## 6. Conclusion

---

La possibilité d'accélérer les essais d'endurance ou de fiabilité, en augmentant les niveaux de stress par rapport à ceux de la vie opérationnelle, constitue une aubaine pour les concepteurs qui peuvent ainsi démontrer la capacité opérationnelle de leur produit à assurer une mission, à moindre coût et dans des délais réduits.

Mais pour être crédible, cette démonstration doit reposer sur des hypothèses explicites, justifiées par l'expérience ou validées par les essais.

Associant des lois de fiabilité ou de dégradation à des lois d'accélération, les modèles de vie accélérée reposent sur des fondements théoriques relativement solides, mais qui doivent s'adapter à chacune des situations en accord avec les experts et technologues des différents métiers (électronique, mécanique...).

Les modes de défaillance prépondérants sont à identifier préalablement ainsi que les contraintes qui accélèrent leur occurrence.

L'effet de contraintes combinées sur des modes de défaillance spécifiques est parfois difficile à appréhender.

Les moyens d'essai disponibles ne permettent pas toujours d'assurer une bonne représentativité des comportements par rapport à la vie opérationnelle.

La testabilité, et notamment l'observabilité directe ou indirecte des niveaux de dégradation ou d'usure, n'est pas un aspect à traiter juste avant les essais mais une caractéristique intrinsèque des produits à considérer au moment de leur conception.

Les modèles de vie accélérée sont très sensibles à la valeur de leurs différents paramètres et peuvent conduire à des résultats totalement erronés si celle-ci est inexacte.

Ces paramètres peuvent être estimés par les essais eux-mêmes sous réserve qu'ils fournissent des données en quantité suffisante et que

celles-ci puissent être traitées correctement au moyen d'outils d'optimisation performants pour ajuster les modèles.

Ces mêmes outils peuvent être utilisés pour optimiser le dimensionnement préliminaire et la planification des essais afin d'en améliorer la précision des résultats ou diminuer l'ensemble des coûts afférents (nombre de pièces à tester, moyens et durée des essais, etc.).

Par ailleurs, les essais accélérés permettent d'établir, dès la phase de conception, des modèles de fiabilité ou de dégradation dans des conditions d'utilisation et d'environnement variées qui constituent une entrée essentielle au pronostic, dans le cadre du Health Monitoring et de la maintenance prédictive exigés dorénavant en exploitation par les opération.

Aussi, méritent-ils la plus grande attention de la part des décideurs.

# Bibliographie

ABB Switzerland Ltd Semiconductors, *Failure rates of HiPak modules due to cosmic rays*, Application Note 5SYA 2042-04.

Bacha M., Celeux G., *Bayesian Estimation of a Weibull distribution in a highly censored and small sample setting*, Rapport INRIA n°2993 - octobre 1996.

Bertholon H., *Une modélisation du vieillissement*, Thèse doctorale, Grenoble1, 2001.

Blish R., Durrant N., *Semiconductor Device Reliability Failure Models Technology Transfer # 00053955A-XFR*, International SEMATECH, May 31, 2000.

Cabarbaye A., *Sureté de Fonctionnement et Optimisation des systèmes*, Cab Innovation éditeur, 2017.

Cabarbaye A., Laulheret R., *Planification et exploitation des essais par la méthode Caboum*, Qualita, 2017.

Cabarbaye A., Tanguy A., Bosse S., *Adjustment of complex probabilistic models and estimation of confidence intervals in a discrete manner*, ESREL 2012.

Cabarbaye A., Faure J., Laulheret R., *Evaluation et optimisation des systèmes par les modèles de simulation récursive*, Lambda mu 15, 2006.

Cabarbaye Adrien, Cabarbaye Aurélien, *L'optimisation multidisciplinaire, l'autre enjeu du Big Data*, Cab Innovation éditeur, 2019.

Cox D.R., *Regression models and life tables*, Journal of the Royal Statistical Society, series B, vol 34, n°2, 1972, pages 187-220.

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.

Fatemi S. Z., *Planification des essais accélérés : optimisation, robustesse et analyse*, Thèse doctorale, ISTIA Angers, 2012.

Guérin F., *Estimation de la fiabilité par les essais*, HDR, ISTIA Angers, 2002.

Micol A., *Approche probabiliste dans la conception des modules de puissance*, Thèse doctorale, Toulouse III, 2007.

NF EN 62506 : *Méthodes d'essais accélérés de produits*, AFNOR, Novembre 2013.

Nikulin M., Couallier V., Gerville-Reache L., *Accelerated Life and Degradation Models in Reliability and Safety: An Engineering Perspective*, EA 2961, Statistique Mathématique et ses Applications, University Victor Segalen Bordeaux 2, Bordeaux, France.

Norris K. C., Landzberg A.H., *Reliability of Controlled Collapse Interconnections*. IBM Journal of Research and Development 13, no. 3 (1969): 266-271.

Sedyakin N.M., *On one physical principle in reliability theory*, Proceedings of Academy of Sciences of USSR, Technical Cybernetics, 3, 80-87, 1966.

Vasudevan V. and Fan X. *An Acceleration Model for Lead-Free (SAC) Solder Joint Reliability Under Thermal Cycling*, Electronic Components and Technology Conference, 2008.

Wald A., *Contributions to the Theory of Statistical Estimation and Testing Hypotheses*, Annals of Mathematical Statistics, vol. 10, no 4, 1939, p. 299–326.

Wilks, S. S., *Determination of Sample Sizes for Setting Tolerance Limits*, The Annals of Mathematical Statistics, Vol.12, pp. 91-96, 1941.

# Mise en œuvre des essais accélérés

Le stress augmente le risque de défaillance et doit être considéré dans les modèles de fiabilité.

Mais cette complexité se révèle un atout dans le domaine des essais d'endurance ou de fiabilité menés pour démontrer la capacité d'un produit à réaliser sa mission. Elle permet, en effet, de réduire la durée des essais et/ou le nombre de pièces à tester en augmentant les niveaux de stress (température, vibration, humidité...).

Les essais doivent cependant révéler les mêmes phénomènes de défaillance ou de dégradation en conditions accélérées et nominales, et les lois d'accélération permettant de passer des résultats d'essais aux performances opérationnelles doivent être connues ou caractérisées par les essais eux-mêmes.

Le dimensionnement des essais puis leur réalisation selon diverses stratégies peuvent être optimisés pour en réduire le coût.

Mais les normes existantes (EN 62506...) fournissent peu de recommandations précises sur leur application (nombre de pièces à tester, types et conditions de stress à appliquer, modèles théoriques à utiliser, valeur des paramètres des lois d'accélération, etc.).

Aussi, ce livre didactique de mise en œuvre des essais accélérés vulgarise leurs fondements théoriques et propose un guide d'application pratique qui recouvre l'état de l'art des techniques de dimensionnement et de planification optimales des essais, dont les résultats constituent également une entrée pour le Health Monitoring et la maintenance prédictive



*Expert sénior en Sûreté de fonctionnement, l'auteur de cet ouvrage dirige la société Cab Innovation qui développe et commercialise des logiciels d'optimisation et de fiabilité. Rédacteur de nombreux articles scientifiques durant son activité au Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), il a créé les groupes Sûreté de Fonctionnement de la région Occitanie et de LinkedIn.*

**ENRICHIE PAR :**

**ALSTOM**



ISBN : 979-10-97287-06-1



9 791097 287061

Prix : 65 € TTC