



Distribution des modes de panne et profils de vie FIDES

Distribution of failure modes and FIDES mission profiles

PELLOQUIN Gaëtan

MBDA France

Le Plessis-Robinson, France

gaetan.pelloquin@mbda-systems.com

MONTIGAUD Thibault

LGM

Vélizy-Villacoublay, France

thibault.montigaud@lgm.fr

SAINTIS Laurent

*LARIS, SFR MATHSTIC, Université
d'Angers*

Angers, France

laurent.saintis@univ-angers.fr

INDMESKINE Fatima-Ezahra

*LARIS, SFR MATHSTIC, Université
d'Angers*

Angers, France

fatima-ezahra.indmeskine@etud.univ-angers.fr

1 **Résumé** — Le catalogue de modes de panne est une donnée usuelle utilisée dans les études de Sûreté de Fonctionnement (SdF). Il décrit,
2 pour chaque type de composant, les pannes, symptômes de sa défaillance et propose des ratios d'occurrence. Ces listes sont particulièrement
3 utilisées pour la réalisation des AMDEC ou les Arbres de Défaillances (AdD). En tout état de cause, ces listes de modes de panne sont
4 également très utiles aux concepteurs de carte électroniques afin de rendre les conceptions plus robustes aux défauts les plus prévisibles. De
5 la même façon, ces éléments sont très intéressants pour traiter du diagnostic en cas de dysfonctionnement constaté. Cependant, si ces
6 catalogues sont utiles, ils diffèrent potentiellement entre applications industrielles. Il est naturel que le catalogue (ses ratios) ne soit pas fixe
7 mais dépende de l'utilisation du composant, du profil de vie qu'il subit ainsi que des stress auxquels il est soumis. Un composant, dans un
8 profil de vie « automobile » ne subira pas les mêmes stress que s'il est intégré en baie avionique d'un long courrier ou embarqué dans un
9 missile en soute d'un navire. Il est donc normal que les mécanismes de défaillance sollicités ne soient pas les mêmes et que les modes de
10 panne les plus probables diffèrent. La plupart des industriels ont donc généré leur propre catalogue, issu de leur expérience. Une alternative
11 au catalogue dogmatique statique est possible à l'aide de la méthodologie FIDES. Elle évalue un taux de défaillance basé sur les stress
12 environnementaux au travers d'un profil de vie (PdV) détaillé et ce, famille de composants par famille de composants. Quelques lois adaptées
13 et simplifiées issues de la physique des défaillances (PoF) permettent ce lien. Il est ainsi possible de faire le lien entre PdV, stress du composant
14 et, à l'aide d'analyse de faits techniques observés, le mode de panne constaté opérationnellement. De là à établir efficacement une relation
15 entre PdV, famille de composants et catalogue de modes de panne, il n'y a qu'un pas que cette publication se propose d'aider à franchir.

16 **Mots-clefs** — *FIDES, FMMEA, AMDEC, FMD, PoF*

17 **Abstract** — *Failure modes distribution is a standard data used in dependability and safety analysis. It describes, for each type of*
18 *component, the failure modes and provides some figures on how often they could occur. These lists are used in FMECA and Fault Trees*
19 *assessment. While these lists are useful for designers of electronic boards to create more robust systems against likely faults, this information*
20 *is also important for diagnostic purposes in case of faulty equipment. However, although these lists are useful, differences could or should*
21 *appear between the use of the system and the industrial domain. The distributions of the failure modes are not fixed but depend on the use of*
22 *the component, the system life profile applied to the component, and the stress it undergoes. An electronic part with an "automotive" life*
23 *profile will not experience the same stress as if it were integrated in a long-haul plane calculator or embedded in a missile in a boat hold. It*
24 *is normal that the failure mechanisms activated are not the same, and that the more likely failure modes are different too. Most industrial*
25 *companies use their own failure modes distribution based on their field return and experience. Today, an alternative to a fixed failure modes*
26 *distribution list seems to be possible with FIDES methodology. The FIDES methodology evaluates a failure rate based on the stress induced*
27 *by a detailed life profile for each family of electronic parts. Some adapted and simplified acceleration laws, based on the physics of failures*
28 *(PoF), allow this link. It is thus possible to create a link between life profile, environmental stress, and thanks to failure observed assessment,*
29 *the failure mode that occurred on the field. With such a link, there is only one step to propose a methodology that links life profile to failure*
30 *modes distribution, and this publication aims to help to make this step.*

31 **Keywords** — *FIDES, FMMEA, FMECA, FMD, PoF*

32

33

I. INTRODUCTION

34

Dans tous les domaines technologiques (mécanique, hydraulique, pyrotechnique, électronique, etc.), les catalogues de modes de panne, listes de symptômes des comportements défaillants des éléments constituant un équipement ou un système, sont utilisés afin d'alimenter les analyses de fiabilité et/ou de sécurité qualitatives comme quantitatives telles que les Analyses des Modes de Défaillances, de leurs Effets et de leur Criticité (AMDEC) ou les Arbres de Défaillances (AdD). En hiérarchisant la fréquence de ces modes de défaillance, et donc implicitement les mécanismes attachés, il est également possible de dimensionner des plans d'essais accélérés (Li et al., 2017) pour la démonstration de fiabilité. C'est plus généralement une donnée prépondérante dans l'ingénierie de la testabilité et du monitoring que ce soit lors de la fabrication au sein même des gammes opératoires, en recette, en qualification, en essais, en maintenance ou en emploi.

42

Parmi les domaines technologiques, l'un d'entre eux a fait l'objet, il y a quelques dizaines d'années, d'un changement d'approche dans l'expression de la fiabilité des éléments développés : l'électronique, avec les travaux autour de la méthodologie FIDES (*Méthodologie d'évaluation de la fiabilité des systèmes électroniques - Guide FIDES 2009 Edition A*, 2011) puis (*Méthodologie d'évaluation de la fiabilité des systèmes électroniques - Guide FIDES 2022 Edition A*, 2023).

46

Si la méthodologie FIDES permet d'évaluer efficacement une fiabilité prévisionnelle pour les systèmes électroniques à travers l'expression d'un taux de défaillance associé aux contraintes environnementales, elle rend accessible certaines équations qui n'étaient pas explicites dans les méthodologies de fiabilité électronique plus anciennes. Basée sur la connaissance des mécanismes de défaillance prépondérants des familles technologiques couvertes et la connaissance de la physique des défaillances (Physics of Failures : PoF), relative à ces mécanismes de défaillance prépondérants, la méthode FIDES permet un lien quasi physique entre la sollicitation du mécanisme et le stress environnemental, couvert par la description d'un profil de vie, élément essentiel de la méthodologie elle-même.

53

Les catalogues de modes de panne usuels, parmi lesquels on peut citer le FMD-2016 (*FMD-2016, Failure Mode/Mechanism Distributions 2016*, 2016) ou encore le RDF 2000 (*TR 62380 - Fiabilité de l'équipement – Méthodes d'évaluation de la fiabilité*, 2004), proposent des listes basées sur le fonctionnement des composants, mais dont la répartition ou distribution reste statique. C'est-à-dire, en simplifiant à l'extrême pour l'exemple, qu'un composant « X » aura toujours 20% de court-circuit et 80% de circuit ouvert, quelle que soit son utilisation. Cette distribution de modes de panne (FMD) n'est pas modifiée par le profil de vie du produit.

59

La prochaine section de cette publication, présente la méthodologie générale, en s'attachant à proposer, sur la base de la méthodologie FIDES et sur des éléments de littérature, une ouverture qui permet d'envisager la possibilité de rendre le catalogue de modes de panne statiques dynamiques, fonction du profil de vie du système électronique considéré, car il est aujourd'hui acquis que les modes de panne préférentiels observés sur un même composant diffèrent qu'il soit utilisé embarqué sur une automobile, un avion ou un missile. La section suivante développe un cas d'application sur les condensateurs céramiques à partir de données disponibles.

65

66

II. MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

67

A. Contexte général

68

FIDES propose un lien « naturel » entre le profil de vie et le taux de défaillance via quatre équations principales formalisant le stress en température (thermique), le stress en variation de température (cycle de température), le stress lié aux sollicitations mécaniques (vibrations) et finalement le stress en humidité (humidité relative).

71

Il est possible, dans la littérature ou même par essais, selon l'expérience et le savoir-faire de certaines sociétés ou laboratoires, de faire des liens privilégiés entre les mécanismes de défaillances et les stress associés. Il est tout à fait possible également, via les mêmes sources ou savoir-faire, de travailler à construire des faisceaux statistiques de présomptions de quels seront les modes de panne qui s'exprimeront préférentiellement si tel ou tel mécanisme de défaillance est favorisé.

75

Partant de ce constat assez spontané, il est alors aisé d'envisager qu'un lien statistique entre modes de panne et profil de vie puisse être tissé assez solidement. Si ce lien est pratiquement accessible mais complexe à établir, encore faut-il que son intérêt soit suffisant pour justifier le traitement de sa complexité.

78

Ainsi, s'il est immédiat de penser « événement de base d'un arbre de défaillance » ou « origine d'une ligne d'AMDEC » quand il est question de modes de panne, l'imprécision relative, mais fondamentale d'un taux de défaillance au niveau d'un unique composant et plus encore au niveau d'un de ses multiples modes de panne, rappelé par le fait que la fiabilité électronique au niveau d'un système n'est que statistique et ne s'entend correcte que si le nombre de composants est important, appelle à une méfiance légitime et bienvenue. Par exemple, se dire que le condensateur C100 de la carte électronique n°10 du système A a 80% de chance de défaillir en court-circuit dans ce profil de vie X et 30% seulement dans ce profil de vie Y ne représente pas nécessairement une meilleure information qu'un simple 50% compte tenu de l'incertitude entourant le taux de défaillance du composant lui-même ou même plus sûrement le profil de vie qui l'accélère.

86

Cependant, il est toutefois intéressant :

87

1. De savoir que la démarche de personnalisation du catalogue de modes de panne au profil de vie est possible,

- 88 2. De fournir cette information aux concepteurs, car même si la valeur finale est à prendre avec tout le recul et la sagesse
 89 propre à une personne traitant de sécurité, elle peut orienter des conceptions, privilégier telle ou telle famille de
 90 composants naturellement plus robuste qu'une autre et contribuer à appuyer le choix des concepteurs comme FIDES
 91 le permet par ailleurs sur la fiabilité elle-même,
- 92 3. De contribuer, à terme, à orienter les essais et les validations ou investigations après essais ou apparition de faits
 93 techniques en utilisation opérationnelle, sur les modes/symptômes les plus probables. Cela peut même aider à
 94 anticiper les solutions de diagnostic.

95 Partant de ce constat, l'effort pour développer la méthodologie semble raisonnable.

96

97 B. Hypothèse et limitations

98 Avant même de poser les bases de la réflexion de l'équation générale qui permettra d'approcher le résultat recherché, il
 99 convient de poser quelques limites et de faire des choix qui apparaissent comme indispensables à faciliter la démarche, mais qui
 100 pourront être remis en question ultérieurement.

101 L'évaluation de la fiabilité prévisionnelle proposée par FIDES est formulée en (1).

$$102 \lambda_{Article} = \lambda_{physique} \times \pi_{PM} \times \pi_{Process} \quad (1)$$

103 Avec :

- 104 • $\lambda_{Article}$: taux de défaillance de l'article considéré (composant électronique, sous-ensemble, cartes COTS, etc.),
- 105 • $\lambda_{physique}$: taux de défaillance « physique » de l'article considéré, reposant sur les lois retenues par famille et
 106 accélérées par le profil de vie appliqué tel que décrit en (2),
- 107 • π_{PM} : facteur « part manufacturing » ou qualité composant, dépendant, entres autres, de sa qualification et des
 108 certifications du fabricant,
- 109 • $\pi_{Process}$: facteur « processus » ou maîtrise du processus fiabilité tout au long du cycle de vie du produit (de la
 110 spécification au retrait de service en passant par la conception, la fabrication, l'intégration et l'exploitation).

111

$$112 \lambda_{physique} = [\sum_{Contributions\ physiques} (\lambda_0 \times \pi_{Accélération})] \times \pi_{Induit} \quad (2)$$

113 Avec :

- 114 • $\lambda_{physique}$: taux de défaillance « physique » de l'article considéré,
- 115 • λ_0 : taux de défaillance « de base » de l'article vis-à-vis de la contribution physique considérée,
- 116 • $\pi_{Accélération}$: facteur d'accélération de la famille de l'article, renseigné des données saisies dans le profil de vie, vis-à-
 117 vis de la contribution physique considérée,
- 118 • π_{Induit} : facteur induit par les *overstress* électrique, mécanique et thermique compte tenu de son environnement ou son
 119 utilisation.

120 Ces rappels étant fait, il apparaît évident qu'il existe des modes de panne et/ou des mécanismes qui n'existent que dans les
 121 domaines de l'induit, du *part manufacturing* ou du process. Il a cependant été fait le choix de considérer tous ces facteurs
 122 multiplicatifs comme de simples « accélérateurs » de mécanismes de défaillances et modes de panne déjà présents
 123 intrinsèquement au composant (favorisés par le λ_0 et le $\pi_{Accélération}$). Cela reste dans un premier temps acceptable, compte tenu
 124 du fait que le constat indique une forte proportion de fragilité « intrinsèque » accélérés. Cela pourra constituer un axe
 125 d'amélioration intéressant.

126

127 C. Équation générale

128 La réflexion élémentaire de cette publication, illustrée en Figure 1, repose sur le fait que :

- 129 • la matrice « Profil de Vie » est une entrée du calcul,
- 130 • les équations fournies par la méthodologie FIDES orientent cette matrice d'entrée vers des facteurs d'accélération
 131 prépondérants. Elles permettent d'obtenir une sensibilité, famille de composants par famille de composants à chaque
 132 stresser environnemental. Cela prend la forme d'un calcul intermédiaire de la méthodologie FIDES (analyse par
 133 stress) où chaque famille se voit attribuer un ratio de son taux de défaillance relatif par grande famille de stress.
- 134 • ces facteurs accélérés par le profil de vie permettent de solliciter leurs mécanismes de défaillances préférentiels,
- 135 • ces mécanismes se révèlent par les modes de défaillances, puis les modes de panne dont ils sont les signatures.

136 Il est alors possible de traduire cela sous la forme de l'équation matricielle générique (3).

137
$$CP = FP \times SM^T \times MM \quad (3)$$

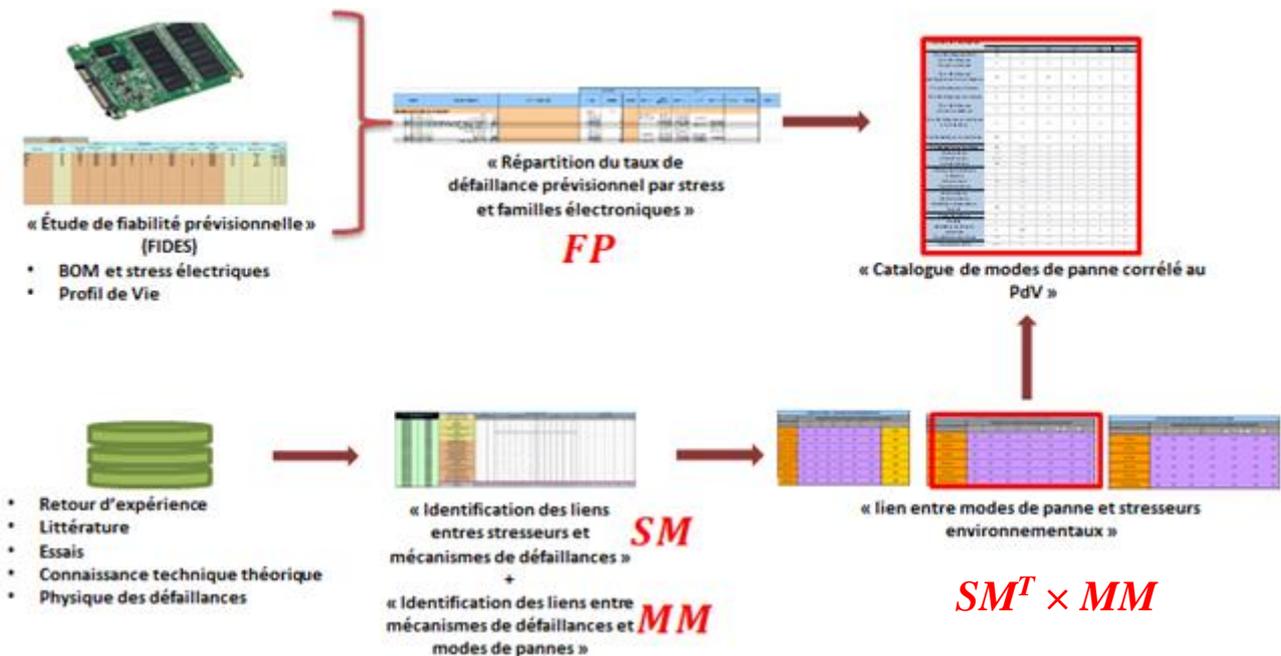
138 Avec :

- 139 • CP : Vecteur du catalogue de modes de panne profilé (corrélé sur le Profil de Vie) pour une famille de composants donnée,
- 140
- 141 • FP : Vecteur de la contribution au taux de défaillance de chaque stress accéléré par le Profil de Vie FIDES (donné par l'évaluation du taux de défaillance par la méthodologie FIDES) pour une famille de composants donnée,
- 142
- 143 • SM : Matrice statistique de relation entre facteurs d'accélération FIDES et mécanismes de défaillances,
- 144 • MM : Matrice statistique de relation entre mécanismes de défaillances et modes de panne.

145 Si les éléments CP et FP sont des vecteurs pour une famille de composants donnée, cela provient du fait que les équations (1)
146 et (2) diffèrent pour chaque famille de composants et qu'il est impossible d'avoir une équation (3) générique, et que donc chaque
147 matrice SM et MM doivent être établies par famille de composants.

148 Le catalogue de modes de panne « profilé » n'est que la concaténation de l'ensemble des CP obtenus par famille de
149 composants.

150 La méthodologie générale d'établissement des catalogues de modes de panne par famille de composants est décrite dans la
151 Figure 1 ci-dessous.



152

153 Figure 1: Illustration des tables et matrices nécessaires à l'obtention d'un catalogue de modes de panne corrélé au profil de vie

154 Chacune de ces matrices fait l'objet d'une explication détaillée dans les paragraphes suivants.

155

156 D. Mécanismes de défaillance et facteurs de stress (SM)

157 Dans le cycle de vie d'un composant électronique, plusieurs mécanismes de défaillance peuvent être activés par différents
158 paramètres environnementaux et opérationnels agissant à différents niveaux de stress. (Cassanelli et al., 2006) ont montré que
159 l'étude des mécanismes de défaillance enrichit la FMEA ordinaire en développant la méthodologie d'analyse des modes, des
160 mécanismes et des effets de défaillance (FMMEA). Cette méthode est basée sur la PoF pour évaluer les causes profondes des
161 défaillances et les mécanismes de défaillance d'un produit donné. La méthodologie de PoF, elle, est basée sur l'identification des
162 mécanismes de défaillance potentiels et des sites de défaillance du système (M. Pecht and A. Dasgupta, 1995; Pecht, 2009). Le
163 processus d'établissement de la FMMEA est décrit notamment dans (Kapur & Pecht, 2014) et (Hendricks et al., 2015).

164 Dans le cas d'un composant électronique, la FMMEA permet d'extraire *a minima* les informations de la TABLE I. ci-dessous.
165 Les facteurs d'environnements sont déduits des mécanismes de défaillance à partir de la PoF.

166

167

TABLE I. FMMEA - ENTÊTE

Types de mode de panne	Modes de défaillance	Causes potentielles	Mécanismes de défaillance	Facteurs d'environnement
[...]				

169

La FMMEA peut être une source fondamentale des matrices dont il sera question dans la suite de cet article.

170

171

172

Dans un premier temps, à partir d'une FMMEA, il est donc possible de créer une matrice relationnelle entre mécanismes de défaillance et facteur de stress environnemental comme le propose la TABLE II.

173

174

175

Cette TABLE II. permet d'identifier une relation entre les mécanismes de défaillance et les stresseurs environnementaux (matrice [Stress – Mécanismes] ou SM).

176

177

178

179

180

181

Cette approche de la matrice SM peut également être consolidée et valorisée par la prise en compte de l'expertise des sociétés et laboratoires d'analyse composant disposant d'un retour d'expérience pouvant être partagé. Ainsi, le PEA REX (Kevin Zurbuch, Michel Giraudeau, Stéphanie WONG, 2012) qui a favorisé la collaboration de plusieurs laboratoires industriels, a permis de partager leurs expériences et expertises respectives afin de constituer une base de connaissance des mécanismes propres à chaque famille de composants couverte par la méthodologie FIDES, ainsi que d'approcher une première version statistique de la matrice SM.

182

183

184

185

186

187

188

Si la FMMEA permet de consolider les relations potentielles entre la présence d'un « stresseur » environnemental dans un profil de vie et « mécanismes » activés, une approche par avis d'expert et le traitement du retour d'expérience des industriels permet quant à elle de constituer un faisceau de présomptions statistiques, qui permet de donner un poids relatif de l'activation d'un mécanisme si la famille ou le composant est soumis à tel ou tel stresser. Bien sûr, ce faisceau de présomptions statistiques, basé sur l'avis d'expert ou même le retour d'expérience des analyses de défaillances, est teinté du domaine d'application et même du choix industriel, rationalisé, des composants retenus dans les conceptions électroniques. Il est donc fondamental que l'exemple traité ici puisse être généralisé par l'utilisation d'un plus grand panel de données.

189

190

191

Un exemple, partiel, de matrice SM, pour une famille de composants donnée, issu de données industrielles, en comptabilisant le nombre de fiches de traitement de faits techniques ayant lié le mécanisme activé au(x) stress environnemental(aux) ayant conduit à la défaillance, est données en TABLE II.

192

TABLE II. EXEMPLE DE RÉPARTITION DES MÉCANISMES DE DÉFAILLANCE PAR STRESS (SM)

Stresseur Mécanisme de défaillance	Type	Π_{Chimique} (Chimique)	$\Pi_{\text{Electrique}}$ (Electrique)	$\Pi_{\text{Humidité}}$ (Humidité)	$\Pi_{\text{Mécanique}}$ (Mécanique)	$\Pi_{\text{Thermique}}$ (Thermique)	$\Pi_{\text{Thermomécanique}}$ (Cyclage thermique)	$\Pi_{\text{Thermoélec}}$ (Thermo Elec)
		Corrosion des connecteurs externes	Commun		0,2	0,25		0,3
Corrosion des connecteurs internes	Commun	0,4	0,1	0,2		0,1		
Corrosion des interconnexions internes	Commun		0,2	0,25		0,3		
[...]								

193

Il convient bien évidemment de vérifier que la somme de chaque colonne vaut 1.

194

195

E. Construction de matrices de probabilités conditionnelles (MM)

196

197

198

199

200

201

Cette matrice [Mécanismes de défaillance– Modes de Panne] (MM) (cf. TABLE IV.) peut être compilée à partir de la littérature, les FMMEA (cf. TABLE I.), mais aussi par essais ou via le retour d'expérience de laboratoires d'analyses ayant en charge l'investigation de faits techniques survenus opérationnellement (ayant donc révélé une panne par son symptôme, son mode de panne) et dont les origines premières ont été recherchées (mécanisme(s) de défaillance activé et parfois même stress environnemental l'ayant sollicité). Une analyse statistique de ces analyses de faits techniques peut alors compléter efficacement la base de connaissance nécessaire à la création de telles matrices.

202

203

204

205

206

L'une des limites émergeant ici est la versatilité des modes de panne qu'il est possible d'identifier dans les recueils. Il est assez rare qu'opérationnellement, les analyses parviennent à ce niveau théorique de détail ou de discrimination de même qu'il est extrêmement rare que les catalogues de modes de panne utilisés par les industriels ne se limitent pas aux quelques modes vraiment utiles à leurs analyses (quelles soient de fiabilité ou de sécurité). Il est donc apparu naturel de restreindre les modes de panne retenus dans la matrice suivant la même logique.

207

208

209

210

Les modes de panne retenus sont donc par exemple le Court-circuit, le Circuit ouvert, le Défaut fonctionnel et la Dérive paramétrique pour un composant passif simple, sachant que la dérive ou l'évolution des autres modes théoriques non couverts ne manqueront pas de compléter ceux-ci à hauteur de 100% (une dérive basse de valeur de résistance finira par exemple en court-circuit comme une dérive haute finira en circuit ouvert). Si toutefois ces modes étaient problématiques au sens de l'analyse

réalisée, il pourrait alors être nécessaire de les intégrer, comme cela est usuellement fait : chaque industriel possède son catalogue adapté à ses besoins, ses produits et leurs utilisations.

Un exemple, partiel, de construction de matrice MM, pour la famille des composants condensateurs, issu de données industrielles, en comptabilisant le nombre de fiches de traitement de faits techniques ayant lié le(s) mécanisme(s) identifié(s) par l'analyse d'un laboratoire d'expertise composant comme ayant conduit à la panne constatée, est données en TABLE III.

TABLE III. EXEMPLE DE TABLE DE CONTINGENCE DES MÉCANISMES DE DÉFAILLANCE PAR MODES DE PANNE POUR UNE FAMILLE DONNÉE

Modes de Panne (retenus) Mécanismes de défaillance	Circuit ouvert	Court-circuit	Défaut fonctionnel	Défaut paramétrique
Défaut composant		11%		3%
EOS		11%		
Fatigue TM brasure		2%		
Fissuration du boîtier ou substrat suite à fragilisation		2%		
MOS	6%	6%		2%
Court-circuit des interconnexion induit par fissuration du diélectrique		13%		
[...]				

Il s'agit là d'un extrait, mais il est évident que pour une matrice complète, il convient de vérifier que la somme vaut 100%.

Pour obtenir la matrice MM, il faudra transformer la table de contingence vers des profils lignes pour obtenir la matrice de répartition des modes de panne par mécanismes de défaillance. La somme de chaque ligne doit être égale à 1 (TABLE IV.).

TABLE IV. EXEMPLE DE MATRICE DE MÉCANISMES DE DÉFAILLANCE PAR MODES DE PANNE POUR UNE FAMILLE DONNÉE ISSUE DE LA TABLE DE CONTINGENCE (MM)

Modes de Panne (retenus) Mécanismes de défaillance	Circuit ouvert	Court-circuit	Défaut fonctionnel	Défaut paramétrique
Défaut composant	0,000	0,786	0,000	0,214
EOS	0,000	1,000	0,000	0,000
Fatigue TM brasure	0,000	1,000	0,000	0,000
Fissuration du boîtier ou substrat suite à fragilisation	0,000	1,000	0,000	0,000
MOS	0,429	0,429	0,000	0,143
Court-circuit des interconnexion induit par fissuration du diélectrique	0,000	1,000	0,000	0,000
[...]				

F. Utilisation du vecteur FP pour obtenir la distribution des modes de panne finale

Dans le cadre de l'évaluation d'un taux de défaillance prévisionnel en utilisant la méthodologie FIDES, les étapes suivantes sont indispensables :

- Identifier et caractériser un profil de vie complet,
- Évaluer l'ensemble des facteurs requis par la méthodologie,
- Saisir une liste de composants et leurs stress respectifs.

Une fois cela fait, on évalue pour chaque composant la valeur de chaque stresser (par exemple via le logiciel ExperTool v2.6 mis à disposition avec la méthodologie FIDES), par phase, avant de les associer et de restituer le taux de défaillance. Il est alors possible d'obtenir un vecteur, famille de composants par famille de composants, décrivant la sensibilité de la famille à chaque stresser identifié par la méthodologie.

Un exemple de vecteur FP, obtenu via l'onglet « By Stress » de l'outil FIDES ExperTool v2.6 disponible gratuitement sur le site internet www.fides-reliability.org et présenté en TABLE V.

TABLE V. EXEMPLE DE SORTIE « BY STRESS » DE FIDES EXPERTOOL V2.6 POUR UNE FAMILLE DONNÉE

Component type	$\Pi_{\text{Thermique}}$ (Thermique)	$\Pi_{\text{Thermomécanique}}$ (Cyclage thermique)	$\Pi_{\text{Mécanique}}$ (Mécanique)	$\Pi_{\text{Humidité}}$ (Humidité)	$\Pi_{\text{Thermoélec}}$ (Thermo Elec)	Π_{Chimique} (Chimique)	$\Pi_{\text{Electrique}}$ (Electrique)
ALUMINIUM CAPACITOR [ECAC]		40,3%	0,3%		59,4%		

238 Ce dernier vecteur FP permet alors de faire le lien entre profil de vie et les stressseurs.

239 Cela permet alors d'établir le catalogue de modes de panne en appliquant l'équation (1).

240 Cette démarche, via l'encapsulation de l'outil ExperTool est automatisable pour un produit donné saisi dans l'outil. En effet,
241 en modifiant le PdV, FP est mis à jour et l'utilisation des matrices MM et SM préétablies permet d'obtenir un catalogue de modes
242 de panne personnalisé au produit et à son utilisation comme illustré pour un exemple de famille en TABLE VI.

243 TABLE VI. EXEMPLE DE CATALOGUE DE MODES DE PANNE OBTENU POUR UN PROFIL DE VIE SPÉCIFIQUE DONNÉ

Modes de Panne (retenus)	Court-circuit	Circuit ouvert	Défaut Paramétrique	Défaut Fonctionnel
Famille de composants				
Condensateur céramique	93%	7%		

244

245 G. Mise à jour des matrices de probabilités conditionnelles

246 Ce paragraphe propose une ouverture possible sur l'utilisation des réseaux bayésiens pour la mise à jour de la matrice SM.

247 La TABLE IV. fournit une estimation statistique de la matrice de probabilité conditionnelle de la répartition des mécanismes
248 de défaillance suivant les différents stress. Il est également possible de construire les matrices de probabilité conditionnelle à
249 partir des répartitions des mécanismes de défaillance et de modes de panne suivant plusieurs profils d'essais.

250 Soit des données de mécanismes de défaillance $MD^{(i)}$ suivant un profil d'essai $FP^{(i)}$, on a la relation $MD^{(i)} = FP^{(i)} \times SM^T$.
251 Cette relation fournit donc plusieurs équations permettant d'obtenir les inconnues de la matrice SM^T .

252 A partir de la FMMEA, les relations possibles entre stressseurs et mécanismes sont établies et cela induit qu'une partie des
253 éléments de la matrice SM^T sont nuls.

254

255 La relation entre stressseurs et mécanismes de défaillance peut donc être vue comme un réseau bayésien simple à 2 niveaux,
256 un premier niveau composé d'un nombre de nœuds équivalents aux stressseurs, et le deuxième au nombre de mécanismes. La
257 matrice SM^T représente les éléments de la matrice de contingence du réseau bayésien.

258 Les différents essais réalisés suivant un profil $FP^{(i)}$ permettent donc une mise à jour de la matrice de contingence en
259 considérant la matrice initiale SM^T comme une information *a priori*.

260

261 III. APPLICATIONS AUX CONDENSATEURS CÉRAMIQUES

262 A. FMMEA du composant et construction de la matrice SM

263

264

Types de mode de panne	Modes de défaillance	Mécanismes de défaillance	Facteurs d'environnement	Références
Circuit ouvert	Circuit ouvert	Fissures thermiques	Thermal cycling; variation of voltage	(Koripella, 1991)
Dérive de paramètre	Intermittent failure (loss of IR)	Dégradation de la Résistance d'Isolement (IR)	RH	(Brock, 2009)
Dérive de paramètre	Change in IR; change in C of 10%	Fissures de flexion	Mechanical (bending)	(<i>MIL-PRF-32535 CAPACITOR CHIP FIXED CERAMIC DIELECTRIC</i> , 2015)
Dérive de paramètre	Parameter shift (IR, i _{LC}) IR Résistance d'Isolement	Migration des lacunes d'oxygène (pour BME)	V; (T worsens it)	(Donahoe et al., 2006; Hernández-López et al., 2018; Liu, 2015)
Dérive de paramètre	lowered net capacitance	Migration des lacunes d'oxygène (pour BME)	RH	(Hernández-López et al., 2018; Liu, 2015)
Dérive de paramètre	i _{LC} degradation (surface IR drops)	Migration électrochimique (ion accumulation)	RH; V; T; (contaminants)	(Bumiller & Hillman, s. d.; Teverovsky, 2019)
Dérive de paramètre	IR degradation	Dégradation de la Résistance d'Isolement (IR)	RH; V; (T)	(Saito et al., 2018)
Dérive de paramètre	Perte de capacitance	Viellissement de la capacité	T	(Curtis, s. d.)
Dérive de paramètre	gradual increase of i _{LC} which leads to self-heating and its subsequent failure	Emballement thermique (Thermal runaway - TRA)	High T; High V	(Hernández-López et al., 2018)
Dérive de paramètre	Decrease in C and an increase in i _{LC} ; catastrophic failure	Résonance Electro-mécanique	Frequency of V	(Blattau & Hillman, s. d.; Teverovsky, 2019)
Dérive de paramètre	Intermittent failure (flex); IR degradation, dissipation factor (std); Short circuit	Migration électrochimique (dendrite growth)	RH; V; T; (contaminants)	
Court-circuit	gradual increase of i _{LC} which leads to self-heating and its subsequent failure	Emballement thermique (TRA)	High T; High V	(Hernández-López et al., 2018)
Court-circuit	Decrease in C and an increase in i _{LC} ; catastrophic failure	Electro-mechanical resonance	Frequency of V, Vibrations et chocs	(Blattau & Hillman, s. d.; Teverovsky, 2019)
Court-circuit	Intermittent failure (flex); IR degradation, dissipation factor (std); Short circuit	Migration électrochimique (dendrite growth)	RH; V; T; (contaminants)	
Court-circuit	Immediate breakdown; early failure	Effet d'avalanche (Avalanche breakdown - ABD)	High V	(Hernández-López et al., 2018)
Court-circuit	Catastrophic, slow degradation (i _{LC})	Migration des lacunes d'oxygène (pour BME)	V; (T worsens it)	(Donahoe et al., 2006; Hernández-López et al., 2018; Liu, 2015)
Court-circuit	ABD failure (LVF)	Migration électrochimique ECM (Solid State)	V (high current density); T	(Bumiller & Hillman, s. d.; Teverovsky, 2019)
Court-circuit	Intermittent failures; unstable leakage current before failures; takes a long time to cause a short	Croissance de fissures	V	(Teverovsky, 2019)
Court-circuit	Intermittent failures; unstable leakage current before failures; takes a long time to cause a short	Croissance de fissures	RH	(Teverovsky, 2019)
Court-circuit	Rupture de la ceramique	Croissance de fissures	Vibrations et chocs	(John Taylor, 2006)

266

267 Dans le cas des condensateurs céramiques, il y a 4 stressors identifiés (Thermo-électrique, Cyclage thermique, Humidité, 268 mécanique) et 13 mécanismes de défaillance. Une première matrice de correspondance issus du retour d'expérience de 269 laboratoire industriel a été établie basée sur le FMMEA. Comme décrit dans la section II.G, une mise à jour de cette première 270 matrice a été effectuée à partir des essais effectués dans le cadre du projet RECOME (Reliability of Electronic Components for 271 Medical applications) qui vise à fournir un guide pour la qualification de la fiabilité des composants électroniques utilisés dans 272 les dispositifs médicaux implantés actifs, avec une attention particulière pour les composants miniatures. Dans ce projet, un 273 ensemble d'essais est réalisé sur 12 types de condensateurs différents (au sens des facteurs technologiques pris en compte dans 274 FIDES), et suivant 5 profils d'essais différents (Température, Humidité, Tension). Ce qui donne donc un ensemble de 60 profils 275 de contributions de stressors FP⁽ⁱ⁾ et données de répartition de mécanismes de défaillance. Une première matrice SM obtenue 276 à partir de ses différents essais pour les condensateurs céramiques est présentée dans la TABLE VIII.

277

TABLE VIII. RÉPARTITION DES MÉCANISMES DE DÉFAILLANCE PAR STRESS POUR LES CONDENSATEURS CÉRAMIQUES (SM)

Stresseur / Mécanisme de défaillance	$\Pi_{Thermique}$	$\Pi_{Thermomécanique}$	$\Pi_{Mécanique}$	$\Pi_{Humidité}$	$\Pi_{Thermoélec}$	$\Pi_{Chimique}$	$\Pi_{Electrique}$
Flex cracks			0,5				
Thermal cracks		0,5	0,1				
Avalanche breakdown (ABD)					0,11		
Thermal runaway (TRA)					0,15		
Oxygen vacancy migration (for BME)				0,25	0,0775		
ECM (ion accumulation)				0,5			
ECM (dendrite growth)				0,1	0,1		
ECM (Solid State)					0,1		
IR degradation				0,15	0,1		
Crack growth		0,5			0,03125		
Electro-mechanical resonance			0,4		0,03125		
Capacitance ageing					0,3		

278

279 B. Données de retour d'expérience pour la construction de la matrice MM

280 La matrice MM ci-dessous est établie à partir de la FMMEA et du retour d'expérience des laboratoires industriels.

281 TABLE IX. MATRICE DE MÉCANISMES DE DÉFAILLANCE PAR MODES DE PANNE POUR LES CONDENSATEURS CÉRAMIQUES (MM)

Modes de Panne (retenus) / Mécanismes de défaillance	Défaut paramétrique	Circuit ouvert	Court-circuit
Flex cracks	1		
Thermal cracks		1	
Avalanche breakdown (ABD)			1
Thermal runaway (TRA)	0,7		0,3
Oxygen vacancy migration (for BME)	0,8		0,2
ECM (ion accumulation)	1		
ECM (dendrite growth)	0,6		0,4
ECM (Solid State)			1
IR degradation	1		
Crack growth			1
Electro-mechanical resonance	0,3		0,7
Capacitance ageing	1		

282

283 Par hypothèse, la matrice de distribution des modes de panne suivant les mécanismes de défaillance reste inchangée quel
284 que soit le profil de mission.

285 C. Application de plusieurs profils de vie et analyse des résultats

286 Suite à l'élaboration des différentes matrices SM et MM pour des condensateurs céramiques, ce paragraphe propose la mise
287 en application sur un cas d'usage issu d'une carte électronique comportant 60 condensateurs. Les condensateurs ont été modélisé
288 dans l'outil ExperTool V2.6 en accord avec les modèles de la méthodologie FIDES 2009 (*Méthodologie d'évaluation de la*
289 *fiabilité des systèmes électroniques - Guide FIDES 2009 Edition A, 2011*), avec des stress composants génériques majorants
290 (derating) selon la classe du facteur CV (Capacitance – Voltage), avec les valeurs par défaut du guide pour les aspects Process
291 et Part Manufacturing. Le paramètre induit est accessible via le « placement » partagé dans l'extrait en Figure 2.

292

Condensateurs céramiques [ECCC]	Condensateur en céramique à coefficient de température non défini (Type II) avec un produit CV fort [ECCC_06]	-	1.3 - Fonction analogique bas niveau non interface	10
Condensateurs céramiques [ECCC]	Condensateur en céramique à coefficient de température défini (Type I) avec un produit CV moyen [ECCC_02]	-	1.3 - Fonction analogique bas niveau non interface	15
Condensateurs céramiques [ECCC]	Condensateur en céramique à coefficient de température non défini (Type II) avec un produit CV moyen [ECCC_05]	-	2 - Fonction analogique bas niveau interface	30
Condensateurs céramiques [ECCC]	Condensateur en céramique à coefficient de température défini (Type I) avec un produit CV faible [ECCC_01]	-	1.3 - Fonction analogique bas niveau non interface	5

293

294 Figure 2: Extrait de la modélisation sur ExperTool v2.6 des composants du cas d'usage

295 Ce cas d'usage de liste de composants a ensuite été utilisé selon 3 PdV différents :

296

- Hélicoptère - Calculateur en baie avionique - Utilisation VIP - Climat tempéré (température extérieure de 15°C),
- Satellite d'orbite géostationnaire - équipement de plateforme (de type calculateur),
- Radio portable militaire.

297

298

299 Les 3 PdV sont accessibles librement dans le guide FIDES 2022 (*Méthodologie d'évaluation de la fiabilité des systèmes*
 300 *électroniques - Guide FIDES 2022 Edition A, 2023*).

301 L'objectif est donc de générer un catalogue de modes de panne pour les condensateurs céramiques pour chacun de ces PdV.

302
 303 A partir de là, trois vecteurs FP ont pu être générés via l'outil, présentés en TABLE X. :

304 TABLE X. VECTEUR FP PAR PROFIL DE VIE POUR LE CAS D'USAGE

Profil	Famille de composants	$\Pi_{\text{Thermique}}$ (Thermique)	$\Pi_{\text{Thermomécanique}}$ (Cyclage thermique)	$\Pi_{\text{Mécanique}}$ (Mécanique)	$\Pi_{\text{Humidité}}$ (Humidité)	$\Pi_{\text{Thermoélec}}$ (Thermo Elec)	Π_{Chimique} (Chimique)	$\Pi_{\text{Electrique}}$ (Electrique)
Hélicoptère VIP	Condensateurs céramiques	0	65,37%	9,32%	0	25,31%	0	0
Satellite GEO	Condensateurs céramiques	0	1,65%	0,03%	0	98,32%	0	0
Radio militaire	Condensateurs céramiques	0	12,74%	5,34%	0	81,92%	0	0

305
 306 De ce tableau intermédiaire et en appliquant l'équation fondamentale (3), les catalogues de modes de panne pour les
 307 condensateurs céramiques et par profil sont obtenus, à la suite en TABLE XI.

308 TABLE XI. RÉSULTATS DES CATALOGUES DE MODES DE PANNE POUR LES CONDENSATEURS CÉRAMIQUES PAR PROFIL DE VIE

Profil	Famille de composants	Dérive de paramètre	Circuit ouvert	Court-circuit
Hélicoptère VIP	Condensateurs céramiques	21,9%	33,6%	44,5%
Satellite GEO	Condensateurs céramiques	62,6%	0,8%	36,6%
Radio militaire	Condensateurs céramiques	55,4%	6,9%	37,7%

309
 310 Sur cette dernière table, une différence de répartition des modes de panne est observable suivant les différents profils de mission.
 311 Cette différence est à mettre en comparaison, par exemple, du catalogue de mode (*FMD-2016, Failure Mode/Mechanism*
 312 *Distributions 2016, 2016*) qui fournit la répartition suivante pour les modes de panne retenus en TABLE XII.

313 TABLE XII. RÉSULTATS DES CATALOGUES DE MODES DE PANNE POUR LES CONDENSATEURS CÉRAMIQUES PAR PROFIL DE VIE

Profil	Famille de composants	Dérive de paramètre	Circuit ouvert	Court-circuit
FMD-2016	Condensateurs céramiques	62,78%	5,98%	31,24%

314
 315 *D. Discussion autour du modèle FIDES des condensateurs céramiques*

316 La FMMEA des condensateurs céramiques, basée sur la littérature, a été effectuée dans le cadre du projet RECOME avec
 317 une vision orientée sur l'utilisation de ce type de composants pour des dispositifs médicaux implantés actifs. Il apparaît
 318 néanmoins un rôle joué par l'humidité dans l'apparition de mécanismes de défaillance issus de défaut de fabrication ou de
 319 vieillissement. Ces mécanismes de défaillance ne sont pas pris en compte dans le modèle FIDES actuel (*Méthodologie*
 320 *d'évaluation de la fiabilité des systèmes électroniques - Guide FIDES 2022 Edition A, 2023*), ce qui est lié notamment au retour
 321 d'expérience basé sur des environnements différents. Il nous a donc semblé important d'inclure un facteur d'accélération associé
 322 à l'humidité sur le modèle de celui issu de la loi de Peck et inclus dans FIDES notamment pour les circuits intégrés. A partir
 323 des résultats actuels, il conviendrait d'évaluer la pertinence de mettre à jour le modèle FIDES des condensateurs céramiques,
 324 en rappelant que les mécanismes de vieillissement restent aujourd'hui hors périmètre de la méthodologie « composant » et
 325 qu'elle ne couvre que les mécanismes de défaillance prépondérant.

327 IV. LIMITES

328 La mise en pratique de la méthodologie de même que sa formalisation mathématique ont permis d'identifier des limites
 329 auxquelles il serait souhaitable d'apporter des éclairages structurés et consolidés.

331 A. Facteurs multiplicatifs et qualitatifs de la méthodologie

332 La démarche retenue considère à ce stade les facteurs multiplicatifs de la méthodologie FIDES (Π_{Process} , Π_{PM} , Π_{Induit}) comme
 333 des accélérateurs de mécanismes intrinsèques et s'exprimant par des modes de panne « classiques ».

334 Si celle-ci est très vraisemblablement en grande partie acceptable, il conviendrait de parvenir à le démontrer par une analyse
335 statistique dédiée et représentative.

336 B. Représentativité en dehors des entités ayant contribué

337 Il a été décrit dans l'ensemble de la démarche proposée l'importance du retour d'expérience et du savoir-faire intégrés aux
338 données manipulées.

339 Si ces données sont indispensables, il conviendra de préciser dans quelle mesure les résultats sont teintés par les secteurs
340 industriels dont elles sont issues.

341 C. Simplification nécessaire utilisée dans l'approche

342 Du fait de la variabilité des profils de vie possibles, de l'évolution constante des modèles de PoF et du poids relatif des
343 mécanismes les uns par rapport aux autres, une approche simplificatrice de la PoF est nécessaire pour réaliser les évaluations
344 des catalogues de modes de panne. C'est une nécessité dans un contexte industriel.

345

346

V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

347 La publication présente la possibilité de constituer des matrices de passage entre stress exprimés dans le profil de vie
348 formalisé via la méthodologie FIDES et mécanisme(s) de défaillance prépondérant(s), puis le lien entre mécanisme(s) et
349 mode(s) de panne avant de proposer quelques résultats sur une famille de composants électroniques. Elle précise les limites de
350 la méthodologie et surtout la possibilité de rendre la pratique généralisable à tous secteurs industriels en partageant les bonnes
351 connaissances comme cela a pu être fait avec la méthodologie FIDES.

352 La méthodologie complète, mise en application par un industriel, a permis de montrer un écart inférieur à 10% entre le ratio
353 de la distribution des modes de panne retenus dans le cadre d'un catalogue personnalisé, statique, et basé sur l'avis d'expert et
354 le ratio obtenu par l'intégration d'un profil de vie usuel pour les produits de l'industriel sur un calculateur type.

355 Tous les acteurs industriels, laborantins, universitaires de bonne volonté et souhaitant contribuer sont les bienvenus afin
356 d'étendre la représentativité de la méthode et poser les bases solides d'un nouveau guide de répartition de modes de panne
357 dynamique (fonction du profil de vie).

358 A partir d'un retour d'expérience plus large, plusieurs perspectives sont envisageables :

- 359 • Les technologies utilisées dans les condensateurs céramiques sont distinctes, ce qui influe sur la FMMEA par type. Il
360 est alors possible d'imaginer la construction de matrices spécifiques suivant le type de condensateurs céramiques,
- 361 • L'apprentissage du réseau bayésien mis en œuvre à partir de données d'essai peut être amélioré pour prendre en
362 compte une évolution de la matrice SM,
- 363 • Les essais réalisés dans le cadre du projet RECOME font apparaître quelques compléments potentiellement utiles, pour
364 certains usages, du modèle de fiabilité comme la prise en compte de l'humidité qui pourrait être appliquée aux
365 condensateurs céramiques.

366

REMERCIEMENTS

367 Les auteurs souhaitent remercier la DGA pour le support de la méthodologie, les membres du GTR IMdR FIDES et en
368 particulier les participants au SG6 pour les échanges ayant permis de formaliser cet article par l'intérêt suscité. Un remerciement
369 particulier est également adressé aux intervenants des entités LGM, MBDA France et de l'Université d'Angers ayant pris le
370 temps de travailler au partage de leurs informations tant méthodologiques que bibliographiques et retours opérationnels.

371 Les auteurs souhaitent également remercier la Région Pays de la Loire et BPI France pour la mise à disposition des moyens
372 ayant permis l'illustration pratique de la méthodologie du catalogue de modes de panne en fonction du profil de vie dans le cadre
373 du projet RECOME.

374

REFERENCES

375

- 376 Blatta, N., & Hillman, C. (s. d.). *DESIGN GUIDELINES FOR CERAMIC CAPACITORS ATTACHED WITH SAC SOLDER*.
377 Brock, J. G. (2009). *THE EFFECTS OF ENVIRONMENTAL STRESSES ON THE RELIABILITY OF FLEXIBLE AND*
378 *STANDARD TERMINATION MULTILAYER CERAMIC CAPACITORS*. Univeristy of Maryland.
- 379 Bumiller, E., & Hillman, C. (s. d.). *A Review of Models for Time-to-Failure Due to Metallic Migration Mechanisms A Review*
380 *of Models for Time-to-Failure Due to Metallic Migration Mechanisms*. DFRSolutions.
- 381 Cassanelli, G., Mura, G., Fantini, F., Vanzi, M., & Plano, B. (2006). Failure Analysis-assisted FMEA. *Microelectronics*
382 *Reliability*, 46(9), 1795-1799. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2006.07.072>
- 383 Curtis, J. (s. d.). *Capacitance Ageing of Ceramic Capacitors*.
- 384 Donahoe, D. N., Pecht, M., Lloyd, I. K., & Ganesan, S. (2006). Moisture induced degradation of multilayer ceramic
385 capacitors. *Microelectronics Reliability*, 46(2), 400-408. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2005.05.008>
- 386 *FMD-2016, Failure Mode/Mechanism Distributions 2016*. (2016).

387 Hendricks, C., Williard, N., Mathew, S., & Pecht, M. (2015). A failure modes, mechanisms, and effects analysis (FMMEA)
388 of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 297, 113-120. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.07.100>

389 Hernández-López, A. M., Aguilar-Garib, J. A., Guillemet-Fritsch, S., Nava-Quintero, R., Dufour, P., Tenailleau, C., Durand,
390 B., & Valdez-Nava, Z. (2018). Reliability of X7R Multilayer Ceramic Capacitors During High Accelerated Life
391 Testing (HALT). *Materials*, 11(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/ma11101900>

392 John Taylor. (2006). *Failure mechanisms in ceramic capacitors*. Taylor Electronics Services.
393 <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:53379861>

394 Kapur, K. C., & Pecht, M. (2014). *Reliability engineering*. Wiley.

395 Kevin Zurbuch, Michel Giraudeau, Stéphanie WONG. (2012, octobre). *Exploitation de données de retours d'expérience*
396 *multi-industriels pour la consolidation des modèles FIDES*. Congrès λμ 18, Tours.

397 Koripella, C. R. (1991). Mechanical behavior of ceramic capacitors. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and*
398 *Manufacturing Technology*, 14(4), 718-724. <https://doi.org/10.1109/33.105123>

399 Li, P., Li, C., & Dang, W. (2017). Accelerated Reliability Demonstration Testing Design Based on Reliability Allocation of
400 Environmental Stresses. *Quality and Reliability Engineering International*, 33(7), 1425-1435.
401 <https://doi.org/10.1002/qre.2115>

402 Liu, D. D. (2015). Insulation Resistance Degradation in Ni–BaTiO₃ Multilayer Ceramic Capacitors. *IEEE Transactions on*
403 *Components, Packaging and Manufacturing Technology*, 5(1), 40-48. <https://doi.org/10.1109/TCPMT.2014.2374576>

404 M. Pecht and A. Dasgupta. (1995). Physics-of-Failure : An Approach to Reliable Product Development. *Journal of the*
405 *Institute of Environmental Sciences*, 38, 30-34.

406 *Méthodologie d'évaluation de la fiabilité des systèmes électroniques—Guide FIDES 2009 Edition A* (UTE C80-811). (2011).
407 *Méthodologie d'évaluation de la fiabilité des systèmes électroniques—Guide FIDES 2022 Edition A*. (2023). [www.fides-](http://www.fides-reliability.org)
408 [reliability.org](http://www.fides-reliability.org)

409 *MIL-PRF-32535 CAPACITOR CHIP FIXED CERAMIC DIELECTRIC*. (2015).

410 Pecht, M. (2009). Prognostics and Health Management of Electronics. In *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. John
411 Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470061626.shm118>

412 Saito, Y., Nakamura, T., Nada, K., & Sano, H. (2018). Insulation resistance degradation mechanisms of multilayer ceramic
413 capacitors during highly accelerated temperature and humidity stress tests. *Japanese Journal of Applied Physics*,
414 57(11S), 11UC04. <https://doi.org/10.7567/JJAP.57.11UC04>

415 Teverovsky, A. (2019). *Cracking Problems in Low-Voltage Chip Ceramic Capacitors*.
416 <https://ntrs.nasa.gov/citations/20190001592>

417 *TR 62380—Fiabilité de l'équipement – Méthodes d'évaluation de la fiabilité*. (2004).

418

419