

Table des matières

Préface	13
Philippe EUDELINÉ	
Avant-propos	17
Abdelkhalak EL HAMI, David DELAUX et Henri GRZESKOWIAK	
Chapitre 1. Essais accélérés	25
Laurent DENIS, Henri GRZESKOWIAK, Daniel TRIAS et David DELAUX	
1.1. Introduction.	25
1.2. Les différents types d'essais	26
1.2.1. Les calculs	26
1.2.2. Les simulations	26
1.2.3. Les essais.	27
1.2.4. Liens entre les trois types de démonstrations.	28
1.3. Généralités sur les essais accélérés	29
1.3.1. Les modèles statistiques	31
1.3.2. Les modèles physiques.	31
1.4. Principe, méthodologie et mise en œuvre des essais accélérés.	32
1.4.1. Définition et notions importantes.	32
1.4.2. Évaluer la fiabilité prévisionnelle d'un système en réalisant des essais	35
1.4.3. Essais accélérés (basés sur le modèle physique) : exemple de l'accélération en température	37
1.4.4. Évaluer la fiabilité prévisionnelle d'un système par rapport à une durée de vie imposée et des contraintes environnementales	37
1.4.5. Chaleur humide	39
1.4.6. Température	40

1.4.7. Les essais accélérés en pratique	41
1.4.8. Évaluation de la fiabilité pour la recherche de mécanismes de défaillance liés à l'usure	41
1.4.9. Conclusion	42
1.5. Méthodes et outils pour exploiter des essais accélérés	43
1.5.1. ADS ou analyse de données de survie	43
1.5.1.1. Échantillon	43
1.5.1.2. Représentativité.	44
1.5.2. Typologie de données	44
1.5.2.1. Modèles de survie	45
1.5.3. Ajustement du modèle	48
1.5.3.1. Cas de différentes lois de durée de vie en concurrence	48
1.5.3.2. Principes du test d'adéquation	50
1.5.3.3. Paramétrage et intervalle de confiance	52
1.5.4. Dégradation	52
1.5.4.1. Principe	52
1.5.4.2. Lois paramétriques usuelles	53
1.5.4.3. Modèles stochastiques de trajectoires	54
1.5.5. MVA ou modèles de vie accélérée	56
1.5.5.1. Principe	56
1.5.5.2. Définition	56
1.5.5.3. Lois à facteur d'échelle	57
1.5.5.4. Lois usuelles	58
1.5.5.5. Loi d'Arrhenius.	58
1.5.5.6. Loi d'Eyring.	59
1.5.5.7. Loi d'accélération en puissance inverse	59
1.5.5.8. Effet de cyclage : loi de Coffin-Manson	59
1.5.5.9. Effet conjoint de la température et de l'humidité : Hallberg et Peck	60
1.5.5.10. Autres lois « multistress »	61
1.6. Les différentes phases de construction d'un plan de validation de la fiabilité	62
1.7. Exemples	63
1.7.1. Corrélation entre un essai accéléré et l'usage en clientèle	63
1.7.1.1. Première étape : essais de fiabilité accélérés.	63
1.7.1.2. Deuxième étape : calcul des retours à partir du parc véhicules et de son âge	64
1.7.1.3. Troisième étape : traitement du retour d'expérience	64
1.7.1.4. Quatrième étape : réalisation des essais accélérés sur une version améliorée de l'équipement	66

1.7.2. Développement d'un essai d'environnement climatique de corrosion pour échangeur automobile	66
1.8. Les normes	77
1.9. Conclusion	77
1.10. Bibliographie	77

Chapitre 2. Essais aggravés 83

Henri GRZESKOWIAK, Tony LHOMMEAU et David DELAUX

2.1. Introduction sur les essais aggravés (ou hautement accélérés)	83
2.1.1. Historique	83
2.1.2. Approche générale	85
2.1.3. Robustesse et fiabilité	88
2.1.4. Types de produits concernés par les essais aggravés	91
2.1.5. Effet du vieillissement sur la SOA (<i>Safe Operating Area</i>) dans le secteur aéronautique	95
2.1.6. Typologie des défauts précipités en essais HALT	98
2.1.6.1. Exemple 1 : carte d'interface	99
2.1.6.2. Exemple 2 : carte électronique « contrôleur de jauges »	101
2.1.6.3. Exemple 3 : EUT télémètre embarqué	102
2.1.6.4. Typologie des défauts rencontrés en essais HALT	106
2.1.7. Exploitation des essais avec marteaux pneumatiques d'une machine HALT : particularités et précautions inhérentes	108
2.2. Comparaison des essais HALT <i>versus</i> ALT par la fatigue	115
2.2.1. Présentation de la démarche suivie.	116
2.2.2. Le spectre de dommage par fatigue	116
2.2.3. Étude de cas automobile : casse d'un onduleur/convertisseur	121
2.2.3.1. Description de l'essai	121
2.2.3.2. Estimation du coefficient de Basquin	126
2.2.3.3. Superposition des spectres de dommage par fatigue	128
2.2.3.4. Critère de fatigue	129
2.2.3.5. Conclusion.	131
2.3. Comparaison des essais accélérés et essais aggravés	132
2.4. Les normes	133
2.5. Bibliographie.	134

Chapitre 3. Étude de la fiabilité des condensateurs aluminium à électrolyte liquide ayant un format cubique 139

Chadia LACHKAR, Moncef KADI, Jean-Paternelle KOUADIO, Jean-François GOUPY, Philippe EUDELIN, Sébastien BOILEAU et Tarik AIT-YOUNES

3.1. Introduction et objectifs	140
3.2. Rappel des caractéristiques	141

3.2.1. Principe de base	141
3.2.2. Géométrie cubique	142
3.2.3. Schéma électrique équivalent	143
3.2.4. Caractéristiques électriques	144
3.2.5. Caractéristiques physiques	145
3.3. Caractérisation paramétrique	145
3.3.1. Mesures de C, ESR et DF	145
3.3.2. Mesure du courant de fuite	145
3.3.3. Mesure des dimensions du boîtier	146
3.3.4. Autres mesures et observations	146
3.3.5. Utilisation des mesures.	147
3.4. Problématique de fiabilité	147
3.4.1. Objectifs spécifiques	148
3.4.2. Profil de mission fonctionnel	148
3.4.3. Profil de mission environnemental	149
3.4.4. Mécanismes de dégradation	150
3.5. Essais de dégradation sur composants	150
3.5.1. Programme des essais	152
3.5.2. Essais thermiques	153
3.5.2.1. Évolution de la capacité	154
3.5.2.2. Évolution de la résistance série équivalente (ESR)	155
3.5.2.3. Évolution du courant de fuite.	155
3.5.2.4. Évolution de l'épaisseur du boîtier	155
3.5.2.5. Évolution de la masse du composant	155
3.5.3. Essais thermoélectriques.	156
3.5.3.1. Évolution de la capacité	156
3.5.3.2. Évolution de la résistance série équivalente (ESR)	157
3.5.3.3. Évolution du courant de fuite.	157
3.5.3.4. Évolution de l'épaisseur du boîtier	157
3.5.3.5. Évolution de la masse du composant	158
3.5.4. Synthèse des résultats d'essais	159
3.6. Analyses et modélisations	160
3.6.1. Influence de la température	160
3.6.2. Influence thermoélectrique	162
3.7. Conclusion et prolongement.	165
3.8. Annexe : notice condensateur électrolytique d'aluminium	166
3.9. Bibliographie.	167

Chapitre 4. Fiabilité des composants : nouvelle génération des condensateurs films 169

Henri GRZESKOWIAK, Lambert PIERRAT, Daniel TRIAS et David DELAUX

4.1. Introduction.	169
4.2. Types de films	170
4.2.1. Polypropylène (PP)	170
4.2.2. Polyéthylène téréphtalate (PET)	170
4.2.3. Polyéthylène naphtalate (PEN)	171
4.2.4. Polysulfure de phénylène (PPS)	171
4.2.5. Téflon (PTFE)	171
4.3. Comparatif	172
4.4. Paramètres influençant la fiabilité	173
4.4.1. Auto-cicatrisation (uniquement pour les films métallisés)	174
4.4.2. Effet corona	175
4.4.3. Humidité, corrosion.	175
4.5. Essai aggravé sur le condensateur film.	176
4.6. Essai accéléré sur condensateurs films	179
4.6.1. Conception de l'essai accéléré	179
4.6.2. Exploitation de l'essai accéléré réalisé	181
4.6.2.1. Rappel du contexte.	181
4.6.2.2. Organisation de la démarche	182
4.6.2.3. Caractéristiques du condensateur	183
4.6.2.4. Profil de mission	184
4.6.2.5. Modalité et résultats d'essai	185
4.6.2.6. Facteur d'accélération	186
4.6.2.7. Traitement des résultats d'essais.	191
4.6.2.8. Estimation de la durée de vie	192
4.6.2.9. Commentaires et perspectives	193
4.7. Conclusions.	196
4.8. Bibliographie.	197

Chapitre 5. Tests de fiabilité et de qualification des transistors MOSFET de puissance 199

Niemat MOULTIF, Mohamed MASMOUDI, Éric JOUBERT et Olivier LATRY

5.1. Introduction.	199
5.2. Tests de fiabilité des MOSFET de puissance	200
5.2.1. Tests de technologie : mécanismes de défaillance des MOSFET de puissance	200
5.2.1.1. Effet de porteur chaud (<i>Hot-Carrier Lifetime</i>).	201
5.2.1.2. Électromigration	202

5.2.1.3. TDDB : <i>Time-Dependent Dielectric Breakdown</i>	202
5.2.2. Tests de qualifications et normes	203
5.2.2.1. Test à haute température : <i>High Temperature Life Tests</i> . . .	204
5.2.2.2. Tests environnementaux	204
5.3. Application des tests standards de fiabilité sur des MOSFET de puissance en silicium	208
5.3.1. Description des composants sous test	208
5.3.1.1. MOSFET type aéronautique (A)	208
5.3.1.2. MOSFET type automobile (B)	209
5.3.2. HTRB	210
5.3.2.1. Description du banc de test	212
5.3.2.2. Résultats	213
5.3.3. ESD	216
5.4. Application des tests de qualifications sur des MOSFET de puissance en carbure de silicium	225
5.4.1. Présentation du composant sous test : MOSFET SiC	225
5.4.2. Tests HTRB et HTGB	226
5.4.2.1. Description du banc de test	226
5.4.2.2. Résultats des tests	229
5.4.3. Étude de la robustesse du MOSFET SiC à la décharge électrostatique	234
5.5. Conclusion	240
5.6. Bibliographie	241

Chapitre 6. Diagnostic de défauts du convertisseur DC-DC pour véhicule électrique 245

Houcine CHAFOUK et Rihab EL HOUDA THABET

6.1. Introduction	245
6.2. Modèle du convertisseur DC-DC	248
6.2.1. Modèle sans incertitudes	249
6.2.2. Modèle LPV avec incertitudes bornées	250
6.3. Méthodologie ensembliste pour la décision et l'isolation de défauts . .	251
6.3.1. Principe de l'observateur	251
6.3.1.1. Règles de construction de l'observateur	253
6.3.2. Détection de défauts par l'observateur	254
6.3.3. Observateur par intervalles	255
6.3.4. Résidus par intervalles	260
6.3.5. Analyse des signatures : détection et localisation	260
6.4. Conclusion	264
6.5. Bibliographie	265

Chapitre 7. Méthodologie et outils de caractérisation physico-chimique employés pour l'analyse de défaillance en laboratoire 267

Morgane PRESLE, Daniel TRIAS et Sébastien BOILEAU

7.1. Introduction.	267
7.2. Analyse de défaillance de composants électroniques	268
7.2.1. Concepts de défaillance	268
7.2.2. Défaillance des condensateurs films	268
7.2.2.1. Autocicatrisation (uniquement pour les films métallisés)	268
7.2.2.2. Effet Corona.	269
7.2.2.3. Humidité, corrosion	270
7.2.3. Défaillance des condensateurs électrochimiques	270
7.2.3.1. Court-circuit.	270
7.2.3.2. Circuit ouvert	270
7.2.3.3. Perte de capacité et augmentation de la tangente delta	270
7.2.3.4. Augmentation du courant de fuite	271
7.2.3.5. Ouverture de l'événement	271
7.2.3.6. Fuite d'électrolyte	271
7.2.4. Méthodologie d'analyse de défaillance	271
7.3. Techniques expérimentales d'analyse physico-chimique	273
7.3.1. Examens avant ouverture	273
7.3.1.1. Aspect	273
7.3.1.2. Microtomographie X.	273
7.3.1.3. Ressuage	275
7.3.2. Examens après ouverture	276
7.3.2.1. Observations macro et microscopiques	276
7.3.2.2. Examen micrographique sur coupe	279
7.3.2.3. Analyse chimique	280
7.3.2.4. DSC.	284
7.4. Conclusion	285
7.5. Bibliographie.	286

Chapitre 8. Étude de la fiabilité des composants mécatroniques de puissance par microscopie à émission de photons spectrale 287

Niemat MOULTIF, Alexis DIVAY, Éric JOUBERT et Olivier LATRY

8.1. Introduction.	287
8.2. Techniques conventionnelles de localisation de défauts	289
8.2.1. Cristaux liquides	289
8.2.2. Microscopie infrarouge	290
8.2.3. Les techniques de stimulation laser	291

8.2.3.1. OBIRCH : <i>Optical Beam Induced Resistance Change</i>	291
8.2.3.2. TIVA : <i>Thermally Induced Voltage Alteration</i>	293
8.2.3.3 SEI : <i>Seebeck Effect Imaging</i>	294
8.2.4. Microscopie à émission de photons	294
8.2.4.1. Origine d'émission de lumière	295
8.2.4.2. Avantages et limitations.	296
8.2.4.3. Principe de mesures en MEP	301
8.2.4.4. Comparaison entre la microscopie à émission de photons et l'OBIRCH : exemple d'application	301
8.3. Analyse spectrale en photoémission	302
8.3.1. Les systèmes existants d'analyse de la photoémission spectrale	302
8.3.2. Descriptif du système développé	303
8.4. Analyse des transistors par microscopie à émission de photons spectrale	306
8.4.1. Étude de la fiabilité des transistors HEMTs AlGaIn/GaN	306
8.4.2. Étude de la fiabilité des transistors MOSFET de puissance en carbure de silicium	309
8.4.2.1. Étude de la robustesse des MOSFET SiC : stress ESD.	309
8.4.2.2. Étude de la fiabilité des MOSFET SiC : stress HTRB	313
8.5. Conclusion	314
8.6. Bibliographie.	315
 Liste des auteurs.	 319
 Index	 321
 Sommaire de <i>Fiabilité des systèmes mécatroniques de forte puissance 1</i>	 323