

Table des matières

Préface	13
Philippe EUDELINÉ	
Avant-propos	17
Abdelkhalak EL HAMI, David DELAUX et Henri GRZESKOWIAK	
Chapitre 1. Fiabilité et innovation : enjeux et défis	27
Claire LARIVOIRE, Fabien MARTY et David DELAUX	
1.1. Introduction.	27
1.2. L’innovation, fer-de-lance de la compétitivité	28
1.3. La fiabilité, un enjeu majeur.	31
1.4. La fiabilité dans le processus d’innovation	34
1.4.1. Le management de l’innovation, critère de succès du duo innovation-fiabilité	34
1.4.2. L’innovation participative entre créativité et technique.	34
1.4.3. Soutien à l’ <i>open innovation</i> via les projets collaboratifs	35
1.5. Conclusion	36
1.6. Bibliographie.	36
Chapitre 2. La fiabilité dans le monde automobile	39
David DELAUX	
2.1. Introduction : histoire de la fiabilité dans le monde automobile	39
2.2. Les défis de la fiabilité automobile : complexité des systèmes et des organisations.	43
2.3. Les enjeux économiques de la fiabilité automobile	47

2.4. Analyse de la fiabilité par l'analyse de la garantie	50
2.5. Conclusion : le futur de la fiabilité dans le monde automobile.	50
2.6. Bibliographie.	51

Chapitre 3. La fiabilité dans le monde aéronautique 53

Tony LHOMMEAU, Régis MEURET et Agnès MATHEVET

3.1. Introduction.	53
3.2. La sécurité et la fiabilité	58
3.3. La maintenabilité/disponibilité	59
3.4. Les enjeux de demain	60
3.5. Conclusion	63
3.6. Bibliographie.	64

Chapitre 4. La fiabilité dans le monde de la défense 65

Henri GRZESKOWIAK

4.1. Introduction.	65
4.2. Sûreté de fonctionnement dans le monde de la défense	66
4.3. Histoire de la fiabilité dans le monde de la défense aux États-Unis	72
4.3.1. Points saillants.	72
4.3.2. Le déverminage	73
4.3.3. Les essais de démonstration de la fiabilité aux États-Unis	74
4.3.4. Les essais de croissance de la fiabilité aux États-Unis	75
4.4. Appréciation sur la fiabilité aux États-Unis de nos jours dans le domaine de la défense.	78
4.4.1. Quelques constats	78
4.4.2. Recommandations pour l'amélioration de cette situation	79
4.5. Importance de la bonne prise en compte des environnements influents dans le profil de vie du produit.	80
4.6. Sites internet dédiés à la diffusion des bonnes pratiques en matière de fiabilité aux États-Unis	81
4.7. Sites internet dédiés à la diffusion des bonnes pratiques en matière de fiabilité en France	89
4.7.1. IMdR (Institut de maîtrise des risques)	89
4.7.2. FIDES.	90
4.7.3. L'ASTE (Association pour le développement des sciences et techniques de l'environnement)	91
4.7.4. <i>WorkShop 10</i> du CEN (<i>European Center of Standardization</i>)	92
4.8. Rappel de quelques cas réels dans le monde de la défense	93
4.8.1. Cas 1 : l'accident du KURKS	93

4.8.2. Cas 2 : essais de fiabilité sur missiles à Point Mugu	93
4.8.3. Cas 3 : essais de fiabilité au CEAT	94
4.8.4. Cas 4 : guerre des Malouines	95
4.8.5. Cas 5 : missile air-air et <i>buffeting</i> pendant le vol captif sur avion de combat	95
4.8.6. Synthèse des leçons tirées de ces cinq cas	96
4.9. Conclusion	97
4.10. Annexe.	98
4.11. Bibliographie	100
Chapitre 5. Objectifs de fiabilité	103
Lambert PIERRAT	
5.1. Introduction	103
5.2. Genèse et problématique de fiabilité	104
5.2.1. Genèse de la fiabilité	104
5.2.2. Problématique prévisionnelle	105
5.3. Concepts et notions de fiabilité	106
5.3.1. Approche qualitative du cycle de vie	106
5.3.2. Notions de fiabilité	108
5.4. Composants et systèmes	111
5.5. Objectifs de fiabilité.	112
5.5.1. Caractéristiques fonctionnelles	112
5.5.2. Objectifs de fiabilité garantis	113
5.6. Adéquation des spécifications.	114
5.6.1. Limitations actuelles	114
5.6.2. Pertinence du MTTF	115
5.7. Approche méthodologique	116
5.7.1. Formulation du problème	117
5.7.2. Ensemble des composants sur carte	118
5.7.3. Composant « critique ».	119
5.7.4. Approche statistique	120
5.8. Conclusion	121
5.9. Bibliographie.	121
Chapitre 6. Composants « critiques »	123
Lambert PIERRAT	
6.1. Introduction	123
6.2. Problématique de fiabilité	125
6.2.1. Composants et système	125
6.2.1.1. Généralités.	125

6.2.1.2. Hiérarchisation des composants	125
6.2.1.3. Notion de macrocomposant	126
6.2.2. Notion de criticité	126
6.2.3. Influence sur la fiabilité du système	128
6.2.3.1. Approche générale	128
6.2.3.2. Hypothèses simplificatrices	129
6.2.3.3. Approche simplifiée	130
6.3. Estimation de la durée de vie d'un condensateur	132
6.3.1. Problématique	132
6.3.2. Informations disponibles	133
6.3.2.1. Caractéristiques du condensateur	133
6.3.2.2. Profil de mission	133
6.3.3. Modalités et résultats d'essais	134
6.3.3.1. Modalités d'essais	134
6.3.3.2. Interprétation des résultats d'essais	135
6.3.4. Facteur d'accélération	136
6.3.4.1. Formulation du modèle d'accélération	136
6.3.4.2. Estimation du facteur d'accélération	138
6.3.5. Durée de vie prévisionnelle	139
6.3.5.1. Traitement des résultats d'essais	139
6.3.5.2. Estimation de la durée de vie	140
6.4. Conclusion	141
6.5. Bibliographie	141

Chapitre 7. Estimation de la fiabilité prévisionnelle 143

Rémy FOUCHEREAU, David DELAUX, Henri GRZESKOWIAK
et Daniel TRIAS

7.1. Introduction	143
7.1.1. Repères historiques des méthodes et standards de fiabilité prévisionnelle pour l'électronique	144
7.1.2. Guide MIL-HDBK-217F	146
7.1.3. Guide RIAC-HDBK-217+.	147
7.1.4. Guide RDF 2000 (UTE C80-810)	149
7.1.5. Guide FIDES	149
7.1.6. Principales différences entre les guides	150
7.1.6.1. Contraintes physiques prises en compte	150
7.1.6.2. Types de profils de mission utilisés	151
7.1.7. Conclusion	151
7.2. Fiabilité prévisionnelle pour quatre composants critiques	152
7.2.1. Remarques générales	152

7.2.2. Condensateur électrochimique	153
7.2.2.1. Contraintes thermiques ou thermoélectriques	153
7.2.2.2. Contraintes de cyclage thermique	154
7.2.2.3. Contraintes induites	155
7.2.2.4. Contraintes mécaniques	156
7.2.2.5. Autres facteurs	156
7.2.2.6. Application à des cas de données réelles	156
7.2.3. Condensateur film	156
7.2.4. IGBT	157
7.2.4.1. Contraintes thermiques ou thermoélectriques	157
7.2.4.2. Contraintes de cyclage thermique	158
7.2.4.3. Contrainte d'humidité	159
7.2.4.4. Contraintes mécaniques	159
7.2.4.5. Contraintes induites	159
7.2.4.6. Application à des cas de données réelles	159
7.2.5. Self de puissance	160
7.2.5.1. Application à des cas de données réelles	160
7.2.6. Composants de puissance : les guides	161
7.3. Conclusion	162
7.4. Bibliographie	163

Chapitre 8. Simulation des effets de dégradation des composants semi-conducteurs en vue d'assurer la fiabilité des circuits intégrés 165

Insaf LAHBIB, Aziz DOUKKALI, Patrick MARTIN, Guy IMBERT,
Philippe DESCAMPS et Dominique DEFOSSEZ

8.1. Introduction.	166
8.1.1. Historique de la fiabilité	168
8.1.2. La conception tenant compte de la fiabilité.	169
8.1.2.1. Intérêt de l'évaluation de la fiabilité durant la phase de conception	169
8.1.2.2. Principe de fonctionnement des simulateurs de fiabilité	170
8.2. Mécanismes de dégradation dans les composants semi-conducteurs actifs	171
8.2.1. Dégradation dans les transistors MOS.	171
8.2.1.1. Principe de fonctionnement d'un transistor MOS.	172
8.2.1.2. La dégradation HCI	172
8.2.1.3. La dégradation BTI	179
8.2.1.4. La dégradation TDDDB	185
8.2.2. Dégradation dans les transistors bipolaires	186

8.2.2.1. Le principe de fonctionnement d'un transistor bipolaire . . .	186
8.2.2.2. La dégradation MMD	187
8.2.2.3. La dégradation RVBE	192
8.2.3. Conclusion	198
8.3. Étude de la dégradation d'un oscillateur en anneau	198
8.3.1. Introduction	198
8.3.2. Présentation de l'oscillateur	198
8.3.3. Étude du vieillissement du circuit selon ses modes de fonctionnement	200
8.3.3.1. Premier mode : en mode veille	200
8.3.3.2. Deuxième mode : en mode activé	202
8.4. Conclusion	206
8.5. Bibliographie	207

Chapitre 9. Étude d'une carte de commandes soumise à des sollicitations aléatoires et estimation du dommage par fatigue

209

Mayssam JANNOUN, Younes AOUES, Emmanuel PAGNACCO,
Abdelkhalak EL HAMI et Philippe POUUNET

9.1. Introduction.	209
9.2. Présentation de la méthodologie proposée.	209
9.3. Modélisation par éléments finis	210
9.3.1. Géométrie, conditions aux limites et propriétés mécaniques des matériaux.	211
9.3.2. Analyse modale	213
9.3.2.1. Analyse modale expérimentale avec les conditions aux limites libres-libres	214
9.3.2.2. Analyse modale avec les conditions aux limites boîtier fixé au banc HALT	217
9.4. Analyse spectrale des vibrations aléatoires	218
9.4.1. Essais hautement accélérés de durée de vie HALT	219
9.4.1.1. Mesures par vibromètre laser 3D et mesures par accéléromètres sur le banc HALT.	220
9.4.2. Simulations numériques	221
9.4.2.1. Signaux mesurés et implémentation dans le modèle EF	221
9.4.2.2. Résultats et interprétations	223
9.5. Application d'un chargement aléatoire stationnaire gaussien	226
9.5.1. Modèle EF et technique du « zoom structural »	227
9.6. Estimation du dommage par fatigue	229
9.6.1. Étude temporelle	230

9.6.2. Étude fréquentielle	230
9.6.3. Calcul du dommage par fatigue et comparaison entre les méthodes	231
9.7. Conclusion	232
9.8. Bibliographie.	233

Chapitre 10. Étude de la fatigue thermomécanique de modules électroniques de puissance pour des applications de traction de véhicules électriques et hybrides (IGBT) 235

Abderahman MAKHLOUFI, Younes AOUES, Abdelkhalak EL HAMI,
Bouchaïb RADI, Philippe POUGNET et David DELAUX

10.1. Introduction	235
10.2. Présentation du <i>Power Module</i> (IGBT).	237
10.3. Les différents modes de défaillance des modules de puissance sous l'effet du cyclage thermique	238
10.3.1. Rupture des substrats céramiques.	238
10.3.2. Fatigue des brasures : puce/substrat et substrat/semelle.	239
10.3.3. Fatigue de la métallisation en aluminium du composant	240
10.4. Les phénomènes physiques en jeu.	240
10.4.1. Les phénomènes thermiques.	240
10.4.1.1. Équation de chaleur en milieu isotrope	241
10.4.1.2. Transfert de chaleur par conduction	241
10.4.1.3. Transfert de chaleur par convection	243
10.4.2. Phénomènes électrothermiques	244
10.4.2.1. Loi d'Ohm	244
10.4.2.2. La conduction électrique.	245
10.4.3. Les phénomènes mécaniques	246
10.4.3.1. Déformation élastique	246
10.4.3.2. Déformation élastoplastique	246
10.4.3.3. Comportement viscoplastique	248
10.5. Modélisation des phénomènes physiques (simulation par la méthode des éléments finis)	250
10.5.1. Couplage fort de la modélisation électro-thermomécanique	251
10.5.1.1. Formulation du couplage électrothermique.	252
10.5.1.2. Formulation du couplage thermomécanique	253
10.5.2. Couplage faible de la modélisation électro-thermomécanique	255
10.5.2.1. Formulation du couplage faible électro-thermomécanique.	255
10.6. Modèles numériques de défaillance du démonstrateur de puissance IGBT	257

10.6.1. Modèle de défaillance par fatigue thermique des fils électriques	257
10.6.2. Modèle de défaillance par fatigue thermique de la brasure	269
10.7. Conclusion	273
10.8. Bibliographie	273

Chapitre 11. Exploration de simulation thermique visant à consolider l'approche fiabiliste

des composants mécatroniques	275
---	------------

Sébastien YON et Éric ROULAND

11.1. Introduction	275
11.2. Modélisation, données d'entrées et conditions limites	276
11.2.1. Onduleur convertisseur et dissipateur thermique	276
11.2.2. Modélisation thermique du composant	278
11.2.3. Modélisation fluide	278
11.2.4. Modélisation globale du système	280
11.2.5. Conditions limites et données d'entrées	281
11.3. Résultats de l'exploitation du modèle numérique	283
11.3.1. Résultats des simulations numériques	283
11.3.1.1. Cas nominal	283
11.3.1.2. Variation de la puissance des éléments	285
11.3.1.3. Variation de la topologie du système	287
11.3.1.4. Simulation de la détérioration des composants	289
11.3.1.5. Étude des cas 2 à 5	290
11.3.2. Lois de fiabilité	292
11.4. Outil numérique : EleXTherm	294
11.5. Bibliographie	295

Liste des auteurs	297
------------------------------------	------------

Index	299
------------------------	------------

Sommaire de *Fiabilité des systèmes mécatroniques de forte puissance 2*

303
