

---

## Table des matières

---

<b>Avant-propos</b> . . . . .	15
<b>Chapitre 1. Essais hautement accélérés associant température, vibrations et humidité.</b> . . . . .	19
Philippe PUGNET, Pierre Richard DAHOO et Jean-Loup ALVAREZ	
1.1. Introduction. . . . .	20
1.2. Caractéristiques des sollicitations générées par le système Super HAT . . . . .	21
1.3. Description du système Super HAT . . . . .	22
1.3.1. Configuration du système . . . . .	22
1.3.2. Système de pilotage et de supervision . . . . .	24
1.3.3. Plan de test . . . . .	25
1.3.4. Servitudes . . . . .	27
1.4. Application . . . . .	28
1.4.1. Dispositif sous test . . . . .	28
1.4.2. Fixation du DST sur la table de la chambre HAT . . . . .	29
1.4.3. Recherche des limites de fonctionnement en température . . . . .	30
1.4.3.1. Recherche des limites de fonctionnement en basse température . . . . .	30
1.4.3.2. Recherche des limites de fonctionnement en haute température . . . . .	32
1.4.4. Recherche des faiblesses aux variations rapides de température . . . . .	32
1.4.5. Recherche des limites en vibrations aléatoires . . . . .	32
1.4.6. Etude des limites aux sollicitations associant variations rapides de température et vibrations aléatoires . . . . .	36
1.4.7. Etude des faiblesses aux sollicitations associant variations rapides de température et humidité . . . . .	36

1.4.8. Etude des limites de robustesse à des sollicitations associant variations rapides de température, humidité et vibrations aléatoires . . .	36
1.4.9. Etude de la robustesse aux contraintes thermiques des blocs fonctionnels assurant la compatibilité électromagnétique . . .	40
1.4.9.1. Emissions conduites . . . . .	40
1.4.9.2. Emissions rayonnées . . . . .	43
1.5. Conclusion . . . . .	43
1.6. Bibliographie . . . . .	43

## **Chapitre 2. Banc de vieillissement de transistors en conditions opérationnelles . . . . . 45**

Pascal DHERBECOURT, Olivier LATRY, Karine DEHAIS-MOURGUES,  
Jean-Baptiste FONDER, Cédric DUPERRIER, Farid TEMCAMANI,  
Hichame MAANANE et Jean-Pierre SIPMA

2.1. Introduction . . . . .	45
2.2. Vieillissement des composants électroniques hyperfréquences en conditions opérationnelles . . . . .	46
2.2.1. Définition du cahier des charges pour la construction du banc . . . . .	46
2.2.2. Génération des contraintes et mesures des paramètres du vieillissement . . . . .	47
2.2.3. Caractérisation statique en mode I-V pulsé <i>in situ</i> . . . . .	51
2.2.4. Mesures des paramètres S <i>in situ</i> . . . . .	54
2.2.5. Dispositif de mise en condition de démarrage à froid. . . . .	54
2.3. Application à l'étude de composants de puissance. . . . .	56
2.3.1. Etude de la fiabilité des transistors de puissance hyperfréquences LDMOS 330 W en conditions opérationnelles de fonctionnement. . . . .	56
2.3.2. Vieillissement accéléré de transistors LDMOS 330 W . . . . .	57
2.3.2.1. Description de la procédure expérimentale. . . . .	58
2.3.2.2. Analyse des résultats expérimentaux . . . . .	58
2.3.2.3. Discussion . . . . .	61
2.3.2.4. Modélisation analytique . . . . .	62
2.3.3. Essais d'endurance à froid sur transistors LDMOS 330 W . . . . .	64
2.3.3.1. Contexte de l'étude. . . . .	64
2.3.3.2. Description du montage . . . . .	65
2.3.3.3. Etude du comportement thermique du transistor . . . . .	66
2.3.3.4. Vieillissement en mode impulsionnel : résultats et analyse . . . . .	67
2.3.3.5. Fonctionnement en mode impulsions longues . . . . .	67
2.3.3.6. Fonctionnement en mode impulsions courtes . . . . .	67
2.3.3.7. Analyse des résultats pour mesure de robustesse à froid. . . . .	68
2.4. Conclusion . . . . .	69
2.5. Bibliographie . . . . .	69

<b>Chapitre 3. Analyse des défauts physiques des systèmes mécatroniques . . .</b>	<b>71</b>
Christian GAUTIER, Eric PIERAERTS et Olivier LATRY	
3.1. Introduction. . . . .	71
3.2. Equipements et méthodologie de l'analyse de défaillance des systèmes mécatroniques. . . . .	73
3.2.1. Ouverture des boîtiers céramiques et enrobés de résine . . . . .	73
3.2.2. Equipement et technique pour la détection et la localisation des défauts . . . . .	76
3.3. Analyse des défauts physiques . . . . .	78
3.3.1. Analyse d'un composant IGBT après essai hautement accélééré. . . . .	78
3.3.1.1. Conditions d'essai et constat . . . . .	79
3.3.1.2. Analyse par rayons X . . . . .	80
3.3.1.3. Analyse électrique . . . . .	80
3.3.1.4. Analyse par microscopie optique . . . . .	82
3.3.1.5. Analyse thermique . . . . .	82
3.3.2. Analyse d'un composant MOSFET après tests sur le banc de surtension électrique . . . . .	84
3.3.2.1. Analyse de construction et décapsulation . . . . .	84
3.3.2.2. Analyse de défaillance par microscopie optique . . . . .	86
3.3.3. Analyse d'un composant GaN50W–HEMT après test sur banc de fiabilité. . . . .	86
3.3.3.1. Caractéristiques de l'amplificateur et conditions expérimentales de vieillissement. . . . .	86
3.3.3.2. Microscopie par émission de photons. . . . .	88
3.3.3.3. Analyses en microscopie électronique en transmission . . . . .	91
3.3.4. Analyse d'un composant LDMOS après test HTOL-RF . . . . .	92
3.3.4.1. Ouverture du LDMOS 300 W capot céramique . . . . .	95
3.3.4.2. Emissions de photons . . . . .	95
3.4. Conclusion . . . . .	97
3.5. Bibliographie. . . . .	98
<b>Chapitre 4. Effet de défauts lacunaires dans les matériaux d'interconnexion . . . . .</b>	<b>99</b>
Pierre Richard DAHOO, Malika KHETTAB, Christian CHONG, Armelle GIRARD et Philippe POUUNET	
4.1. Introduction. . . . .	100
4.2. Transferts thermiques et thermoélasticité . . . . .	102
4.2.1. Conduction . . . . .	103
4.2.2. Convection . . . . .	103
4.2.3. Rayonnement . . . . .	104

4.2.4. Equation de diffusion de la chaleur . . . . .	104
4.2.5. Thermomécanique et thermoélasticité . . . . .	105
4.3. Description de la méthode numérique . . . . .	110
4.4. Simulation des effets thermiques et thermomécaniques du matériau d'interconnexion d'un module électronique. . . . .	112
4.4.1. Variation de la température et de la déformation en présence d'un défaut lacunaire . . . . .	114
4.4.2. Températures maximales en fonction de la tension ou de la taille du défaut . . . . .	115
4.4.3. Etude de l'effet des défauts lacunaires en taille et en position dans les MIC . . . . .	117
4.4.4. Etude de l'effet de la disposition des défauts lacunaires dans les MIC . . . . .	119
4.4.5. Effets thermomécaniques sur les matériaux d'un module mécatronique de puissance . . . . .	120
4.4.6. Analyse des résultats . . . . .	121
4.5. Conclusion . . . . .	122
4.6. Bibliographie . . . . .	122
<b>Chapitre 5. Modélisation électro-thermomécanique de systèmes mécatroniques . . . . .</b>	<b>125</b>
Abderahman MAKHLOUFI, Younes AOUES et Abdelkhalak EL HAMI	
5.1. Introduction. . . . .	125
5.2. Théorie du couplage électro-thermomécanique. . . . .	126
5.2.1. Mise en équation du problème thermique. . . . .	126
5.2.1.1. Equation de chaleur en milieu isotrope . . . . .	126
5.2.1.2. Transfert de chaleur par conduction. . . . .	127
5.2.1.3. Transfert de chaleur par convection. . . . .	129
5.2.2. Phénomènes électrothermiques . . . . .	130
5.2.3. Formulation numérique du couplage électro-thermomécanique . . . . .	131
5.2.3.1. Couplage électrothermique . . . . .	132
5.2.3.2. Couplage thermomécanique . . . . .	133
5.2.3.3. Couplage électro-thermomécanique. . . . .	135
5.3. Simulation par la méthode des éléments finis du comportement électro-thermomécanique . . . . .	136
5.3.1. Couplage fort de la modélisation électro-thermomécanique. . . . .	138
5.3.2. Couplage faible de la modélisation électro-thermomécanique . . . . .	138
5.4. Exemple de simulation électro-thermomécanique d'un transistor TBH. . . . .	139
5.4.1. Modèle global . . . . .	140

5.4.1.1. Modélisation numérique des effets de serrage sur le comportement de la semelle . . . . .	140
5.4.1.2. Modélisation globale de l'amplificateur HPA . . . . .	142
5.4.2. Modèle local du transistor HBT . . . . .	143
5.5. Analyse modale des composants mécatroniques . . . . .	147
5.5.1. Mise en équation du problème vibratoire . . . . .	147
5.5.2. Formulation variationnelle . . . . .	148
5.5.3. Approximation par éléments finis . . . . .	148
5.5.4. Résolution dans le domaine fréquentiel . . . . .	150
5.5.4.1. Calcul des fréquences propres (analyse modale) . . . . .	150
5.5.4.2. Calcul de la fonction de réponse en fréquence. . . . .	151
5.6. Analyse modale stochastique des structures. . . . .	151
5.7. Identification numérique des paramètres élastiques des composants électroniques. . . . .	152
5.8. Exemple de modélisation et simulation du comportement vibratoire des composants mécatroniques. . . . .	154
5.9. Conclusion . . . . .	161
5.10. Listes des abréviations et des symboles . . . . .	162
5.11. Bibliographie . . . . .	163
<b>Chapitre 6. Création de métamodèle . . . . .</b>	<b>165</b>
Bouzid AIT-AMIR, Philippe POUGET et Abdelkhalak EL HAMI	
6.1. Introduction. . . . .	165
6.2. Notion de métamodèle . . . . .	166
6.3. Sélection des facteurs : définition du plan de criblage ou <i>screening</i> . . . . .	166
6.4. Création de plans d'expérience . . . . .	168
6.4.1. Plans centraux composites (CC) . . . . .	169
6.4.2. Plans de Box et Behnken . . . . .	171
6.4.3. Plans D-Optimaux . . . . .	172
6.4.4. Plans de Doehlert . . . . .	173
6.4.5. Plans <i>Latin Hypercube Sampling</i> . . . . .	174
6.5. Modélisation de la surface de réponse : régression PLS et krigeage . . . . .	176
6.5.1. Régression PLS . . . . .	176
6.5.2. Le krigeage. . . . .	178
6.5.3. Comparaison de modèle . . . . .	180
6.6. Analyse de sensibilité du modèle : décomposition de la variance, le critère de Sobol. . . . .	182
6.6.1. Principe. . . . .	182
6.6.2. Application à un modèle de krigeage . . . . .	184
6.7. Conception robuste . . . . .	185

6.8. Conclusion . . . . .	189
6.9. Bibliographie . . . . .	190
<b>Chapitre 7. Optimisation fiabiliste des systèmes électroniques embarqués . . . . .</b>	<b>191</b>
Younes AOUES, Abderahman MAKHLOUFI et Abdelkhalak EL HAMI	
7.1. Introduction . . . . .	191
7.2. La modélisation physico-probabiliste . . . . .	193
7.2.1. Les méthodes de l'analyse de fiabilité des structures . . . . .	195
7.2.2. Méthode des simulations Monte-Carlo . . . . .	198
7.2.2.1. Simulation de Monte-Carlo pour l'estimation des moments statistiques . . . . .	198
7.2.2.2. Simulation de Monte-Carlo pour l'analyse de fiabilité . . . . .	199
7.2.3. Modélisation probabiliste du joint de brasure en fatigue thermique . . . . .	199
7.2.3.1. Méthodologie et démarche adoptée . . . . .	200
7.2.3.2. Principaux résultats . . . . .	203
7.3. Méthodologie de l'optimisation fiabiliste . . . . .	205
7.3.1. Formulations de la RBDO . . . . .	207
7.3.2. Approche RIA ( <i>Reliability Index Approach</i> ) . . . . .	208
7.3.3. Approche SORA ( <i>Sequential Optimization and Reliability Assessment</i> ) . . . . .	208
7.3.4. Optimisation fiabiliste en utilisant une surface de réponse . . . . .	210
7.4. Optimisation fiabiliste des couches de matériaux des modules de puissance HBT . . . . .	211
7.4.1. Modèle éléments finis de la carte HPA . . . . .	213
7.4.2. Formulation du problème d'optimisation déterministe et fiabiliste du HPA . . . . .	215
7.4.3. Principaux résultats . . . . .	217
7.5. Conclusion . . . . .	219
7.6. Bibliographie . . . . .	219
<b>Chapitre 8. Architecture haut rendement d'amplificateurs de puissance . . . . .</b>	<b>221</b>
Farid TEMCAMANI, Jean-Baptiste FONDER, Cédric DUPERRIER et Olivier LATRY	
8.1. Introduction . . . . .	221
8.2. Méthodologie . . . . .	222
8.3. Tests de vieillissement . . . . .	223
8.3.1. Protocole des essais . . . . .	223
8.3.2. Impact du régime RF pulsé sur le courant de repos $I_{D0}$ . . . . .	224

---

8.4. Autres résultats . . . . .	225
8.4.1. Suivi des performances . . . . .	225
8.4.2. Caractérisations RF . . . . .	226
8.4.3. Mesures statiques . . . . .	228
8.5. Discussion sur l'origine des dégradations . . . . .	230
8.6. Analyses physiques . . . . .	231
8.6.1. Descriptif . . . . .	231
8.6.2. Observation visuelle . . . . .	232
8.6.3. Localisation des défauts par des techniques non destructives . . . . .	233
8.6.4. Analyse microstructurale des dégradations : TEM et FIB . . . . .	233
8.7. Règles de conception des amplificateurs. . . . .	236
8.7.1. Vers des amplificateurs à haut rendement . . . . .	236
8.7.2. Introduction de la fiabilité directement dans le modèle du composant . . . . .	237
8.8. Conclusion . . . . .	239
8.9. Bibliographie . . . . .	239
<b>Index . . . . .</b>	<b>243</b>