

---

## Table des matières

---

|  |    |
|--|----|
| <b>Avant-propos</b> . . . . .  | 13 |
| <b>Chapitre 1. Optimisation de la conception par la fiabilité</b> . . . . .  | 17 |
| Philippe POUGET et Hichame MAANANE   |    |
| 1.1. Introduction. . . . .   | 18 |
| 1.2. La conception par la fiabilité . . . . .  | 19 |
| 1.2.1. Evaluation des risques par la fiabilité prévisionnelle . . . . .  | 21 |
| 1.2.2. Identification des éléments critiques pour la fiabilité<br>du système . . . . .   | 22 |
| 1.2.3. Détermination de la distribution des contraintes provoquant<br>les défaillances . . . . .   | 25 |
| 1.2.4. Détermination du niveau de criticité des contraintes . . . . .  | 27 |
| 1.2.5. Provoquer les défaillances et les analyser. . . . .   | 31 |
| 1.2.5.1. Essais hautement accélérés . . . . .  | 33 |
| 1.2.5.2. Essais accélérés. . . . .   | 33 |
| 1.2.5.3. Analyse de la défaillance . . . . .   | 34 |
| 1.2.6. Modélisation des défaillances. . . . .  | 35 |
| 1.2.7. Optimisation de la conception . . . . .   | 37 |
| 1.3. Conclusion . . . . .  | 38 |
| 1.4. Bibliographie. . . . .  | 39 |
| <b>Chapitre 2. Caractérisation non destructive par ellipsométrie<br/>spectroscopique des interfaces de dispositifs mécatroniques</b> . . . . . | 41 |
| Pierre Richard DAHOO, Malika KHETTAB, Jorge LINARES et Philippe POUGET   |    |
| 2.1. Introduction. . . . .   | 42 |
| 2.2. Relation entre les paramètres ellipsométriques<br>et les caractéristiques optiques d'un échantillon . . . . .                             | 43 |

|  |    |
|--|----|
| 2.3. Ellipsomètres à élément tournant ou à modulateur de phase . . . . .                                     | 45 |
| 2.4. Relation entre les paramètres ellipsométriques et l'intensité<br>du signal détectée . . . . .           | 47 |
| 2.5. Analyse des données expérimentales . . . . .  | 47 |
| 2.6. Le modèle structural à empilement . . . . .   | 50 |
| 2.7. Le modèle optique . . . . .   | 50 |
| 2.8. Application de la technique d'ellipsométrie . . . . .   | 52 |
| 2.8.1. Couche mince à base de nanograins d'argent frittés<br>sur un substrat de cuivre . . . . .             | 54 |
| 2.8.2. Analyse des spectres ellipsométriques de polymères<br>sur différents substrats . . . . .              | 56 |
| 2.8.3. Analyse et comparaison après contrainte . . . . .   | 63 |
| 2.8.4. Analyse physique de l'interaction lumière-matière<br>en termes d'énergie de bande interdite . . . . . | 65 |
| 2.8.4.1. Analyse de l'interface B1/Quartz . . . . .  | 65 |
| 2.8.4.2. Analyse de l'interface B1/Aluminium . . . . .   | 66 |
| 2.9. Conclusion . . . . .  | 66 |
| 2.10. Bibliographie . . . . .  | 67 |

**Chapitre 3. Méthode de caractérisation de l'environnement  
électromagnétique dans des circuits hyperfréquences encapsulés  
dans des cavités métalliques . . . . .**

|  |    |
|--|----|
| Samh KHEMIRI, Abhishek RAMANUJAN, Moncef KADI et Zouheir RIAH  | 69 |
| 3.1. Introduction . . . . .  | 69 |
| 3.2. Théorie des cavités métalliques . . . . .   | 70 |
| 3.2.1. Définition . . . . .  | 70 |
| 3.2.2. Champ électromagnétique dans une cavité<br>parallélépipédique . . . . .   | 70 |
| 3.2.3. Fréquences de résonance . . . . .   | 71 |
| 3.3. Effet des cavités métalliques sur les émissions rayonnées<br>des circuits hyperfréquences . . . . .   | 72 |
| 3.3.1. Circuit d'étude : ligne microruban 50 ohms . . . . .  | 72 |
| 3.3.1.1. Effet sur les paramètres S . . . . .  | 73 |
| 3.3.1.2. Effet sur les cartographies du champ magnétique . . . . .   | 75 |
| 3.4. Estimation du champ électromagnétique rayonné en présence<br>de la cavité à partir du champ électromagnétique rayonné sans cavité . . . . . | 77 |
| 3.4.1. Principe de la méthode . . . . .  | 77 |
| 3.4.2. Modèle d'émission rayonnée . . . . .  | 78 |
| 3.4.2.1. Topographie du modèle . . . . .   | 79 |
| 3.4.2.2. Extraction des paramètres . . . . .   | 80 |
| 3.4.2.3. Obtention du vecteur initial des paramètres du modèle . . . . .   | 80 |
| 3.4.2.4. Optimisation des paramètres . . . . .   | 81 |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.4.2.5. Modèle du cas testé . . . . .  | 82        |
| 3.4.3. Résultats et discussions . . . . .   | 82        |
| 3.4.4. Résultats et analyses . . . . .  | 83        |
| 3.5. Conclusion . . . . .   | 86        |
| 3.6. Bibliographie . . . . .  | 87        |
| <br>  |           |
| <b>Chapitre 4. Mesure des déformations et des déplacements statiques<br/>et vibratoires par des méthodes plein champ . . . . .</b>  | <b>89</b> |
| Ioana NISTEA et Dan BORZA   |           |
| 4.1. Introduction. . . . .  | 90        |
| 4.2. Interférométrie speckle . . . . .  | 92        |
| 4.2.1. Principe de la mesure des champs de déplacements<br>par interférométrie speckle . . . . .  | 92        |
| 4.2.1.1. Interférométrie speckle à intégration temporelle . . . . .   | 94        |
| 4.2.1.2. Mesure des déformations statiques d'origine thermique<br>ou mécanique . . . . .  | 97        |
| 4.2.2. Description du banc de mesure par interférométrie speckle . . . . .  | 99        |
| 4.2.3. Exemples de mesures des champs de déplacements<br>statiques . . . . .  | 100       |
| 4.2.3.1. 4.2.3.1 Effet du vissage et de l'ordre de vissage sur les<br>déformations d'une carte électronique. . . . .  | 101       |
| 4.2.3.2. Deux cartes contrôleur moteur équipées<br>(mesure de déformées suite aux sollicitations<br>thermomécaniques produites par convection) . . . . .                        | 103       |
| 4.2.3.3. Mesure des déformations avec dissipation thermique<br>sur un boîtier avec des éléments chauffants (résistances)<br>qui simulent les transistors de puissance . . . . . | 107       |
| 4.2.4. Exemples de mesures des champs de déplacements<br>vibratoires . . . . .  | 108       |
| 4.2.5. Exemples de mesures dynamiques . . . . .   | 114       |
| 4.3. Moiré de projection . . . . .  | 115       |
| 4.3.1. Principes de la mesure des champs de déplacements<br>par moiré de projection . . . . .   | 116       |
| 4.3.2. Description du banc de mesure par moiré de projection . . . . .  | 117       |
| 4.3.3. Exemples de mesures des champs de déplacements<br>par moiré de projection . . . . .  | 118       |
| 4.4. Projection de lumière structurée. . . . .  | 118       |
| 4.4.1. Principes de la mesure de forme par lumière structurée . . . . .   | 119       |
| 4.4.2. Description du banc de mesure par lumière structurée . . . . .   | 121       |
| 4.4.3. Exemples de mesures des formes 3D par projection<br>de lumière structurée . . . . .  | 122       |
| 4.5. Conclusion . . . . .   | 123       |

|  |            |
|--|------------|
| 4.6. Bibliographie . . . . .   | 124        |
| <br>   |            |
| <b>Chapitre 5. Caractérisations de transistors de commutation<br/>aux contraintes de surtension électrique . . . . .</b>             | <b>125</b> |
| Patrick MARTIN, Ludovic LACHEZE, Alain KAMDEL et Philippe DESCAMPS   |            |
| 5.1. Introduction . . . . .  | 125        |
| 5.2. Banc de robustesse aux contraintes électriques ESD/EOV . . . . .  | 126        |
| 5.2.1. Description du banc TPG . . . . .   | 126        |
| 5.2.2. Contraintes appliquées sur le transistor . . . . .  | 127        |
| 5.2.3. Procédure de test . . . . .   | 129        |
| 5.2.4. Capacités du TPG . . . . .  | 130        |
| 5.3. Résultats de simulation . . . . .   | 130        |
| 5.3.1. Phénomènes mis en évidence . . . . .  | 130        |
| 5.3.2. Influence des phénomènes parasites . . . . .  | 131        |
| 5.4. Dispositif expérimental . . . . .   | 134        |
| 5.4.1. Résultats de mesures et analyse des phénomènes observés . . . . .   | 135        |
| 5.4.1.1. Mesures $V_{BR}$ des transistors IR_CR . . . . .  | 135        |
| 5.4.1.2. Mesures $V_{BR}$ des transistors IR_CR, BUK_CX<br>et NP110_CE . . . . .   | 135        |
| 5.4.1.3. Interprétation des mesures $I_{DS}(V_{DS})$ et $I_{DS}(V_{GS})$ . . . . .   | 136        |
| 5.5. Conclusion . . . . .  | 143        |
| 5.6. Bibliographie . . . . .   | 143        |
| <br>   |            |
| <b>Chapitre 6. Fiabilité des transistors radiofréquence de puissance<br/>aux agressions électromagnétique et thermique . . . . .</b> | <b>145</b> |
| Samh KHEMIRI et Moncef KADI  |            |
| 6.1. Introduction . . . . .  | 145        |
| 6.2. La technologie GaN . . . . .  | 146        |
| 6.3. Contrainte électromagnétique rayonnée . . . . .   | 147        |
| 6.3.1. Présentation du banc de contrainte . . . . .  | 148        |
| 6.3.2. Résultats et analyses . . . . .   | 149        |
| 6.4. Contrainte continue RF CW . . . . .   | 153        |
| 6.4.1. Présentation du banc de contrainte . . . . .  | 153        |
| 6.4.2. Résultats et analyses . . . . .   | 153        |
| 6.5. Contrainte thermique . . . . .  | 155        |
| 6.5.1. Présentation du banc . . . . .  | 155        |
| 6.5.2. Résultats et analyses . . . . .   | 156        |
| 6.5.2.1. Etude à la température $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . . . . .   | 156        |
| 6.5.2.2. Etude à la température $T = -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . . . . .  | 157        |
| 6.6. Contraintes simultanées : RF CW + EM et Electrique + EM . . . . .   | 160        |

|  |     |
|--|-----|
| 6.6.1. Effet de l'application simultanée de contraintes électromagnétique et RF . . . . .          | 160 |
| 6.6.2. Effet de l'application simultanée de contraintes électromagnétique et continue DC . . . . . | 162 |
| 6.7. Conclusion . . . . .  | 164 |
| 6.8. Bibliographie . . . . .   | 164 |

### **Chapitre 7. Mesure de la température interne**

#### **des composants électroniques . . . . . 167**

Eric JOUBERT, Olivier LATRY, Pascal DHERBECOURT, Maxime FONTAINE,  
Christian GAUTIER, Hubert POLAERT et Philippe EUDELIN

|   |     |
|---|-----|
| 7.1. Introduction . . . . .   | 167 |
| 7.2. Dispositif expérimental . . . . .  | 168 |
| 7.3. Résultats des mesures . . . . .  | 170 |
| 7.3.1. Mesures IR . . . . .   | 170 |
| 7.3.2. Mesures électriques . . . . .  | 173 |
| 7.3.2.1. Calibration de la diode . . . . .  | 173 |
| 7.3.2.2. Mesures . . . . .  | 173 |
| 7.3.3. Mesures optiques . . . . .   | 176 |
| 7.3.3.1. Principe . . . . .   | 176 |
| 7.3.3.2. Résultats préliminaires . . . . .  | 179 |
| 7.3.4. Comparaison entre les méthodes de mesures infrarouges et électriques . . . . . | 181 |
| 7.4. Conclusion . . . . .   | 184 |
| 7.5. Bibliographie . . . . .  | 185 |

### **Chapitre 8. Fiabilité prévisionnelle des systèmes électroniques embarqués : référentiel FIDES . . . . . 187**

Philippe POUGNET, Franck BAYLE, Hichame MAANANE  
et Pierre Richard DAHOO

|  |     |
|--|-----|
| 8.1. Introduction . . . . .  | 188 |
| 8.2. Présentation du guide FIDES . . . . .                               | 189 |
| 8.2.1. Modélisation globale . . . . .                                    | 189 |
| 8.2.2. Modèle générique . . . . .  | 189 |
| 8.2.3. Bases mathématiques . . . . .                                     | 190 |
| 8.2.4. Justification du taux de défaillance/intensité constant . . . . . | 191 |
| 8.2.5. Estimation de $\lambda_0$ . . . . .                               | 192 |
| 8.2.6. Facteurs d'accélération . . . . .                                 | 193 |
| 8.2.7. Profil de vie . . . . .   | 193 |
| 8.2.8. Expérimentation au niveau des cartes électroniques . . . . .      | 195 |
| 8.2.9. Expérimentation au niveau des équipements . . . . .               | 197 |

|  |     |
|--|-----|
| 8.2.10. Expérimentation au niveau « famille de composants » . . . . .              | 198 |
| 8.2.11. Exemple des transistors de puissance « MOSFET » . . . . .                  | 200 |
| 8.2.11.1. Choix de la loi de la physique de la défaillance . . . . .               | 200 |
| 8.2.11.2. Fiche de traçabilité . . . . .   | 200 |
| 8.3. Calcul FIDES sur système mécatronique automobile . . . . .                    | 201 |
| 8.3.1. Objectifs du calcul FIDES . . . . .   | 202 |
| 8.3.2. Méthodologie . . . . .  | 203 |
| 8.3.3. Profil de vie . . . . .   | 203 |
| 8.3.3.1. Saisie des données . . . . .  | 203 |
| 8.3.4. Carte SMI . . . . .   | 207 |
| 8.3.4.1. Résultats par type de composants . . . . .                                | 207 |
| 8.3.4.2. Carte FR4 . . . . .   | 208 |
| 8.3.4.3. Fils connexions entre les cartes SMI et FR4 . . . . .                     | 209 |
| 8.3.5. Taux de défaillance du convertisseur DC/DC . . . . .                        | 209 |
| 8.3.6. Effet de l'amplitude des cycles thermiques<br>sur la durée de vie . . . . . | 209 |
| 8.3.7. Comparaison avec les résultats du référentiel<br>UTE C 80-810 . . . . .     | 209 |
| 8.4. Conclusion . . . . .  | 210 |
| 8.5. Bibliographie . . . . .   | 211 |
| <br>   |     |
| <b>Chapitre 9. Etude du contact dynamique entre solides déformables</b> . . . . .  | 213 |
| Bouchaib RADI et Abdelkhalak EL HAMI   |     |
| 9.1. Introduction . . . . .  | 213 |
| 9.2. Préliminaires . . . . .   | 215 |
| 9.3. Résultats théoriques . . . . .  | 216 |
| 9.4. Méthode numérique proposée . . . . .  | 221 |
| 9.4.1. Traitement du contact . . . . .   | 222 |
| 9.4.2. Schéma en temps . . . . .   | 223 |
| 9.5. Résultats numériques . . . . .  | 224 |
| 9.5.1. Principe de fonctionnement du moteur piézoélectrique . . . . .              | 224 |
| 9.5.2. Modélisation et résultats numériques . . . . .                              | 226 |
| 9.6. Conclusion . . . . .  | 228 |
| 9.7. Bibliographie . . . . .   | 229 |
| <br>   |     |
| <b>Index</b> . . . . .   | 231 |