

# Table des matières

|   |    |
|---|----|
| <b>Préface de Philippe Le Poac</b> . . . . .                                | 1  |
| <b>Préface d'Antoine Grall</b> . . . . .                                    | 7  |
| <b>Avant-propos</b> . . . . .   | 11 |
| <b>Remerciements</b> . . . . .  | 13 |
| <b>Présentation des auteurs</b> . . . . .                                   | 15 |
| <b>Chapitre 1. Objectifs et introduction.</b> . . . . .                     | 19 |
| André LANNON  |    |
| 1.1. Les objectifs de cet ouvrage . . . . .                                 | 19 |
| 1.2. La fiabilité, une application de la théorie des probabilités . . . . . | 20 |
| 1.2.1. La définition de la fiabilité . . . . .                              | 20 |
| 1.2.2. Les premiers temps de la fiabilité . . . . .                         | 21 |
| 1.2.3. La naissance de la fiabilité moderne . . . . .                       | 23 |
| 1.2.4. Le développement de la fiabilité moderne (1948-1960) . . . . .       | 23 |
| 1.2.5. L'avènement des fiabilistes (1960-1974) . . . . .                    | 24 |
| 1.2.6. La <i>safety culture decade</i> (1975-1990) . . . . .                | 26 |
| 1.2.7. Maximiser efficacité, performances et profits (1990-2007) . . . . .  | 26 |
| 1.2.8. Le retour à la sûreté, l'aversion au risque (2007-2020) . . . . .    | 27 |

|  |    |
|--|----|
| 1.3. La production nucléaire d'électricité . . . . . | 28 |
| 1.4. Présentation du contenu de l'ouvrage . . . . .  | 34 |
| 1.5. Bibliographie . . . . .                         | 36 |

## **Chapitre 2. Les données d'entrée : retour d'expérience et expertise . . . . . 39**

André LANNOY et Emmanuel REMY

|   |    |
|---|----|
| 2.1. Les objectifs du retour d'expérience . . . . .                                     | 39 |
| 2.2. La définition du retour d'expérience . . . . .                                     | 41 |
| 2.3. La démarche du retour d'expérience . . . . .                                       | 43 |
| 2.4. Le retour d'expérience « événementiel » . . . . .                                  | 46 |
| 2.5. Le retour d'expérience « matériel » . . . . .                                      | 48 |
| 2.5.1. Le modèle de maintenance : une approche par fonction . . . . .                   | 48 |
| 2.5.2. L'analyse de défaillance . . . . .   | 49 |
| 2.5.3. Les critères de défaillance . . . . .  | 51 |
| 2.5.4. La qualité des données . . . . .   | 52 |
| 2.5.4.1. Au niveau de la collecte des informations . . . . .                            | 52 |
| 2.5.4.2. Au niveau de l'analyse . . . . .   | 52 |
| 2.6. L'analyse de fiabilité . . . . .   | 53 |
| 2.6.1. Les composants étudiés . . . . .   | 54 |
| 2.6.2. Les caractéristiques des données . . . . .                                       | 55 |
| 2.6.3. Principes d'estimation simple des données de fiabilité<br>pour les EPS . . . . . | 56 |
| 2.7. Conclusion . . . . .   | 58 |
| 2.8. Bibliographie . . . . .  | 60 |

## **Chapitre 3. Les principes du calcul de fiabilité dans les EPS de niveau 1 . . . . . 63**

Marc BOUISSOU

|  |    |
|--|----|
| 3.1. Introduction . . . . .  | 63 |
| 3.2. La base de tous les calculs : une approximation exponentielle . . . . . | 65 |
| 3.2.1. Le principe des approximations exponentielles . . . . .               | 65 |
| 3.2.2. Approximation exponentielle SRI . . . . .                             | 66 |
| 3.3. Les modèles utilisés . . . . .  | 68 |
| 3.3.1. Les arbres d'événements . . . . .                                     | 68 |
| 3.3.1.1. Arbres d'événements simples/avec dépendances . . . . .              | 69 |
| 3.3.1.2. Ambiguïté des arbres d'événements . . . . .                         | 71 |
| 3.3.2. Les arbres de défaillances . . . . .                                  | 72 |

|   |     |
|---|-----|
| 3.4. La quantification des EPS . . . . .  | 74  |
| 3.4.1. Calcul de probabilité des CI conditionnelle à un initiateur. . . . .                 | 76  |
| 3.4.2. Calcul des facteurs d'importance. . . . .  | 78  |
| 3.4.3. Calcul d'incertitude. . . . .  | 80  |
| 3.5. La question du niveau de détail . . . . .  | 81  |
| 3.6. Problèmes pratiques : taille des modèles, fortes probabilités. . . . .                 | 83  |
| 3.6.1. La taille des modèles et l'explosion combinatoire. . . . .                           | 83  |
| 3.6.2. Les EPS incendie, inondation, séisme : problème<br>des fortes probabilités . . . . . | 84  |
| 3.7. Modèles « cousins » des modèles EPS . . . . .  | 86  |
| 3.7.1. Les <i>Event Sequence Diagrams</i> . . . . .   | 86  |
| 3.7.2. Les nœuds papillon . . . . .   | 87  |
| 3.7.3. Les BDMP ( <i>Boolean Logic Driven Markov Processes</i> ) . . . . .                  | 87  |
| 3.8. Comment améliorer la précision des EPS classiques ? . . . . .                          | 91  |
| 3.8.1. Principes de la méthode I&AB . . . . .   | 91  |
| 3.8.2. Les gains permis par I&AB . . . . .  | 92  |
| 3.8.3. Application numérique de I&AB. . . . .   | 93  |
| 3.9. Une voie de recherche : les « EPS dynamiques ». . . . .                                | 96  |
| 3.10. Logiciels pour réaliser les EPS. . . . .  | 98  |
| 3.11. Bibliographie . . . . .   | 100 |

## **Chapitre 4. Fiabilité des structures : présentation générale, applications pour les centrales nucléaires . . . . . 105**

Emmanuel ARDILLON

|  |     |
|--|-----|
| 4.1. Présentation générale de l'analyse de fiabilité des structures (AFS) . . . . .              | 105 |
| 4.1.1. Pourquoi l'AFS ? . . . . .  | 105 |
| 4.1.2. L'AFS : ses concepts. . . . .   | 108 |
| 4.1.2.1. L'AFS : un cas particulier de traitement d'incertitude . . . . .                        | 108 |
| 4.1.2.2. L'AFS : une des trois familles d'approches fiabilistes<br>pour les composants . . . . . | 109 |
| 4.1.3. Des fondements anciens mais une histoire récente . . . . .                                | 109 |
| 4.1.4. L'AFS : du cas R-S (méthode contrainte-résistance)<br>au cas général . . . . .            | 110 |
| 4.1.4.1. Le cas R-S (méthode contrainte-résistance) . . . . .                                    | 110 |
| 4.1.4.2. Le cas général. . . . .   | 111 |
| 4.1.5. Aperçu des méthodes de calcul . . . . .   | 113 |
| 4.1.5.1. Simulation de Monte-Carlo. . . . .  | 113 |
| 4.1.5.2. Les deux grandes familles de méthodes classiques . . . . .                              | 113 |
| 4.1.5.3. Quelques méthodes avancées. . . . .   | 116 |

|   |     |
|---|-----|
| 4.1.6. OpenTURNS : l’outil de traitement d’incertitude codéveloppé et utilisé chez EDF . . . . .            | 117 |
| 4.2. La fiabilité des structures dans l’industrie de production d’électricité d’origine nucléaire . . . . . | 119 |
| 4.2.1. Optimisation de la politique de maintenance des générateurs de vapeur. . . . .                       | 120 |
| 4.2.2. Risque de rupture brutale des cuves REP . . . . .  | 121 |
| 4.3. Le pressuriseur, exemple d’exercice exploratoire d’application des approches probabilistes . . . . .   | 122 |
| 4.4. L’optimisation probabiliste de la maintenance de bâches des centrales nucléaires . . . . .             | 124 |
| 4.4.1. Introduction . . . . .   | 124 |
| 4.4.2. Spécification du problème (étape A). . . . .   | 125 |
| 4.4.2.1. Critère de défaillance . . . . .   | 125 |
| 4.4.2.2. Significativité de la corrosion . . . . .  | 126 |
| 4.4.2.3. Modèle retenu. . . . .   | 126 |
| 4.4.3. Quantification des incertitudes (étape B) . . . . .  | 127 |
| 4.4.3.1. Variable $\varepsilon'$ . . . . .  | 127 |
| 4.4.3.2. Variable $c_{0i, \text{réel}}$ . . . . .   | 128 |
| 4.4.4. Propagation des incertitudes : calcul du risque global de sous-épaisseur (étape C) . . . . .         | 128 |
| 4.4.5. Utilisation des résultats probabilistes : détermination des points à réparer . . . . .               | 129 |
| 4.4.5.1. Approche retenue. . . . .  | 129 |
| 4.4.5.2. Résultats numériques . . . . .   | 130 |
| 4.4.6. Conclusion et perspectives de cette application . . . . .  | 131 |
| 4.4.6.1. Intérêt industriel . . . . .   | 131 |
| 4.4.6.2. Intérêt scientifique . . . . .   | 131 |
| 4.5. La fiabilité des conduites forcées en hydroélectricité – Diagnostics de tenue mécanique. . . . .       | 132 |
| 4.6. Conclusion . . . . .   | 134 |
| 4.7. Bibliographie. . . . .   | 135 |

**Chapitre 5. Modélisations probabilistes et statistiques pour la fiabilité des matériels industriels . . . . . 141**

Emmanuel REMY

|   |     |
|---|-----|
| 5.1. Introduction. . . . .                      | 141 |
| 5.2. Quelques généralités en préambule. . . . . | 142 |
| 5.3. Approches non paramétriques . . . . .      | 148 |
| 5.4. Modèles paramétriques . . . . .            | 151 |

|   |     |
|---|-----|
| 5.4.1. Introduction . . . . .   | 151 |
| 5.4.2. Quelques modèles adaptés aux composants non réparables . . . .               | 152 |
| 5.4.3. Prise en compte de facteurs influents . . . . .                              | 157 |
| 5.4.4. Modèles de maintenance imparfaite<br>pour les matériels réparables . . . . . | 160 |
| 5.4.5. Modèles stochastiques de dégradation. . . . .                                | 166 |
| 5.5. Statistique fréquentielle. . . . .   | 172 |
| 5.6. Statistique bayésienne. . . . .  | 179 |
| 5.7. Validation et sélection de modèles . . . . .                                   | 183 |
| 5.8. Cas d'étude pour illustration. . . . .   | 186 |
| 5.9. Ouvertures et perspectives de R&D . . . . .                                    | 189 |
| 5.10. Outils logiciels . . . . .  | 190 |
| 5.11. Bibliographie . . . . .   | 191 |

## **Chapitre 6. Les dimensions humaines et organisationnelles de la fiabilité et de la sûreté nucléaire. . . . . 197**

Nicolas DECHY, Yves DIEN et Jean-François VAUTIER

|  |     |
|--|-----|
| 6.1. Introduction et contexte historique dans le nucléaire . . . . .   | 197 |
| 6.2. Définition des dimensions humaines et organisationnelles<br>de la fiabilité et de la sûreté nucléaire . . . . . | 199 |
| 6.3. Théories des accidents et de la fiabilité . . . . .   | 201 |
| 6.4. Des méthodes de collecte et d'analyse des données des sciences<br>humaines et sociales . . . . .                | 207 |
| 6.5. Fiabiliser les activités humaines. . . . .  | 209 |
| 6.5.1. « L'erreur humaine » : l'homme, un agent de fiabilité, faillible . .  | 210 |
| 6.5.2. La formation . . . . .  | 212 |
| 6.5.3. Appliquer la procédure ou faire preuve de compétences ? . . . .   | 214 |
| 6.5.4. Analyser l'activité réelle et les situations de travail . . . . .   | 215 |
| 6.5.5. Les interfaces homme-machine : le cas des salles de commande .  | 216 |
| 6.5.6. La prise en compte des FOH lors de la conception<br>et des modifications . . . . .                            | 217 |
| 6.5.7. Les actions de conduite et leur faisabilité. . . . .  | 218 |
| 6.5.8. Approche quantitative de la fiabilité humaine . . . . .   | 220 |
| 6.5.9. Les facteurs humains dans les interventions en maintenance . . .  | 220 |
| 6.6. Fiabiliser les organisations du travail et le management des risques . .  | 222 |
| 6.6.1. Démarche qualité et systèmes de management de la sûreté . . . .   | 222 |
| 6.6.2. Culture de sûreté . . . . .   | 224 |
| 6.6.3. Gestion prévisionnelle des emplois et compétences – Gestion<br>des ressources humaines. . . . .               | 225 |
| 6.6.4. Le management de la sûreté au quotidien, la prise de décision . .   | 226 |

|   |     |
|---|-----|
| 6.6.5. L'analyse de risques, l'anticipation . . . . .                                     | 227 |
| 6.6.6. L'adaptation, la résilience, l'urgence et la crise . . . . .                       | 229 |
| 6.6.7. L'analyse d'événement et le processus de retour d'expérience . . . . .             | 230 |
| 6.6.8. La conduite du changement organisationnel . . . . .                                | 231 |
| 6.6.9. Organisation de la maintenance et de la sous-traitance . . . . .                   | 232 |
| 6.7. Aspects transversaux . . . . .   | 234 |
| 6.7.1. Les défis de l'intégration, de l'organisationnel<br>et de la temporalité . . . . . | 234 |
| 6.7.2. L'apport de l'approche systémique . . . . .  | 236 |
| 6.7.3. Réflexivité et approche critique. . . . .  | 237 |
| 6.7.4. Spécialistes FOH et relais FOH : l'apport des réseaux FOH. . . . .                 | 238 |
| 6.8. Conclusion . . . . .   | 238 |
| 6.9. Bibliographie . . . . .  | 240 |

**Chapitre 7. Du trop peu au trop-plein : l'impact du Big Data. . . . . 253**

André LANNOY et Emmanuel REMY

|  |     |
|--|-----|
| 7.1. Introduction. . . . .   | 253 |
| 7.2. Vers une meilleure connaissance ? . . . . .                       | 255 |
| 7.2.1. Une nouvelle collecte du retour d'expérience . . . . .          | 255 |
| 7.2.2. L'importance du prétraitement et de la validation . . . . .     | 257 |
| 7.2.3. Une meilleure vision du profil de fonctionnement. . . . .       | 258 |
| 7.2.4. Vers les méthodes du Big Data . . . . .                         | 259 |
| 7.2.5. Les approches fiabilistes. . . . .                              | 260 |
| 7.2.6. Le traitement <i>a posteriori</i> ou la visualisation. . . . .  | 264 |
| 7.3. Diagnostic et pronostic . . . . .                                 | 265 |
| 7.3.1. Le diagnostic. . . . .  | 265 |
| 7.3.2. Le pronostic . . . . .  | 267 |
| 7.3.3. Les modèles classiques de fiabilité pour le pronostic . . . . . | 268 |
| 7.4. La confiance . . . . .  | 269 |
| 7.5. Conclusion . . . . .  | 270 |
| 7.6. Bibliographie. . . . .  | 272 |

**Chapitre 8. Conclusions et perspectives. . . . . 275**

André LANNOY

|  |     |
|--|-----|
| 8.1. Centrales nucléaires et progrès de la fiabilité . . . . .                 | 276 |
| 8.2. Les enjeux liés à la fiabilité ? . . . . .                                | 278 |
| 8.3. Des perspectives pour le futur . . . . .                                  | 279 |
| 8.3.1. Concernant les données du retour d'expérience et leur qualité . . . . . | 279 |
| 8.3.2. Concernant la fiabilité des systèmes . . . . .                          | 280 |

|   |            |
|---|------------|
| 8.3.3. Concernant la fiabilité des structures . . . . .                               | 281        |
| 8.3.4. Concernant les données du Big Data et la fiabilité<br>des composants . . . . . | 282        |
| 8.3.5. Concernant la fiabilité des organisations et des activités . . . . .           | 283        |
| 8.4. Bibliographie . . . . .  | 285        |
| <b>Liste des auteurs . . . . .</b>  | <b>289</b> |
| <b>Index . . . . .</b>  | <b>291</b> |